

日本国特許庁

PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

49657-961

Itoga, et al.

S# 09/769,490

Filed: 1/26/01

McDermott, Will & Emery

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日

Date of Application:

1999年 5月28日

出願番号

Application Number:

平成11年特許願第149621号

出願人

Applicant(s):

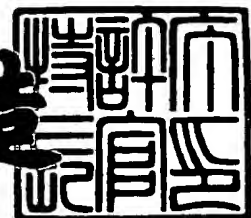
三菱電機株式会社
キヤノン株式会社



2001年 1月26日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

及川耕造



出証番号 出証特2001-3001419

【書類名】 特許願
【整理番号】 514139JP01
【提出日】 平成11年 5月28日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 G21K 5/02
【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社
社内

【氏名】 糸賀 賢二

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社
社内

【氏名】 北山 豊樹

【発明者】

【住所又は居所】 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社
社内

【氏名】 渡辺 豊

【発明者】

【住所又は居所】 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社
社内

【氏名】 鶴沢 俊一

【特許出願人】

【識別番号】 000006013

【氏名又は名称】 三菱電機株式会社

【特許出願人】

【識別番号】 000001007

【氏名又は名称】 キヤノン株式会社

【代理人】

【識別番号】 100064746

【弁理士】

【氏名又は名称】 深見 久郎

【選任した代理人】

【識別番号】 100085132

【弁理士】

【氏名又は名称】 森田 俊雄

【選任した代理人】

【識別番号】 100091395

【弁理士】

【氏名又は名称】 吉田 博由

【選任した代理人】

【識別番号】 100091409

【弁理士】

【氏名又は名称】 伊藤 英彦

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 008693

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 X線露光装置、X線露光方法、X線マスク、X線ミラー、シンクロトロン放射装置、シンクロトロン放射方法および半導体装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 X線について 0. 4 5 nm未満の波長領域および 0. 7 nm 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーを備える、X線露光装置。

【請求項 2】 前記X線はシンクロトロン放射源から出射した放射光に含まれる、請求項 1 に記載のX線露光装置。

【請求項 3】 前記X線ミラーは、0. 3 nm未満の波長領域のX線を 9 0 %以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーを含む、請求項 1 または 2 に記載のX線露光装置。

【請求項 4】 前記X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される 1 種のミラー材料を含む、請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項に記載のX線露光装置。

【請求項 5】 前記X線ミラーは、基板と、その基板上に形成された前記ミラー材料を含む層とを備える、請求項 4 に記載のX線露光装置。

【請求項 6】 前記X線ミラーはX線を集光する機能を有する、請求項 1 ～ 5 のいずれか 1 項に記載のX線露光装置。

【請求項 7】 前記X線ミラーは、前記X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する、請求項 1 ～ 6 のいずれか 1 項に記載のX線露光装置。

【請求項 8】 X線集光ミラーをさらに備える、請求項 1 ～ 7 のいずれか 1 項に記載のX線露光装置。

【請求項 9】 前記X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する拡大ミラーをさらに備える、請求項 1 ～ 8 のいずれか 1 項に記載のX線露光装置。

【請求項 1 0】 前記X線ミラーにおけるX線が入射する面は機械的に研磨

されている、請求項 1 ～ 9 のいずれか 1 項に記載の X 線露光装置。

【請求項 1 1】 前記 X 線ミラーにおける X 線が入射する面は化学的に研磨されている、請求項 1 ～ 9 のいずれか 1 項に記載の X 線露光装置。

【請求項 1 2】 X 線マスクをさらに備え、前記 X 線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成された X 線吸収体とを含み、

前記メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される 1 種を含む、請求項 1 ～ 1 1 のいずれか 1 項に記載の X 線露光装置。

【請求項 1 3】 X 線マスクをさらに備え、前記 X 線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成された X 線吸収体とを含み、

前記メンブレンは、X 線について 0. 4 5 nm 未満の波長領域および 0. 7 nm 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、

前記 X 線吸収体は、0. 6 nm 以上 0. 8 5 nm 未満の波長領域において吸収端を有する材料を含む、請求項 1 ～ 1 1 のいずれか 1 項に記載の X 線露光装置。

【請求項 1 4】 前記 X 線吸収体は積層された第 1 層と第 2 層とを含む、請求項 1 2 または 1 3 に記載の X 線露光装置。

【請求項 1 5】 前記第 1 層に含まれる第 1 材料は、前記第 2 層に含まれる第 2 材料の原子量よりも大きな原子量を有する、請求項 1 4 に記載の X 線露光装置。

【請求項 1 6】 前記 X 線ミラーを複数備える、請求項 1 ～ 1 5 のいずれか 1 項に記載の X 線露光装置。

【請求項 1 7】 前記 X 線ミラーを 2 枚以上 4 枚以下備える、請求項 1 6 に記載の X 線露光装置。

【請求項 1 8】 複数の前記 X 線ミラーのうち最後に X 線が到達する X 線ミラーから出射する X 線の出射方向が、複数の前記 X 線ミラーのうち最初に X 線が到達する X 線ミラーに入射する X 線の入射方向とほぼ同一である、請求項 1 6 または 1 7 に記載の X 線露光装置。

【請求項 1 9】 前記 X 線ミラーの位置を調節する機能と、

前記X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備える、請求項 1 6 ～ 1 8 のいずれか 1 項に記載のX線露光装置。

【請求項 2 0】 複数の前記X線ミラーのうち最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射光軸が、複数の前記X線ミラーのうち最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射光軸とほぼ同一である、請求項 1 6 または 1 7 に記載のX線露光装置。

【請求項 2 1】 前記出射光軸をほぼ同一に保った状態で、
前記X線ミラーの位置を調節する機能と、
前記X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備える、請求項 2 0 に記載のX線露光装置。

【請求項 2 2】 前記X線ミラーから出射するX線のピーク波長を変更することが可能な請求項 1 9 または 2 1 に記載のX線露光装置。

【請求項 2 3】 X線について 0. 4 5 n m 未満の波長領域および 0. 7 n m 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有するX線ミラー。

【請求項 2 4】 シンクロトロン放射源から出射した放射光に含まれるX線を反射する、請求項 2 3 に記載のX線ミラー。

【請求項 2 5】 0. 3 n m 未満の波長領域のX線を 9 0 % 以上吸収して短波長をカットする、請求項 2 3 または 2 4 に記載のX線ミラー。

【請求項 2 6】 前記X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される 1 種のミラー材料を含む、請求項 2 3 ～ 2 5 のいずれか 1 項に記載のX線ミラー。

【請求項 2 7】 基板と、その基板上に形成された前記ミラー材料を含む層とを備える、請求項 2 6 に記載のX線ミラー。

【請求項 2 8】 X線を集光する機能を有する、請求項 2 3 ～ 2 7 のいずれか 1 項に記載のX線ミラー。

【請求項 2 9】 X線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する、請求項 2 3 ～ 2 8 のいずれか 1 項に記載のX線ミラー。

【請求項 3 0】 X線が入射する面が機械的に研磨されている、請求項 2 3 ～ 2 9 のいずれか 1 項に記載の X線ミラー。

【請求項 3 1】 X線が入射する面が化学的に研磨されている、請求項 2 3 ～ 2 9 のいずれか 1 項に記載の X線ミラー。

【請求項 3 2】 X線について 0. 4 5 n m未満の波長領域および 0. 7 n m超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含む X線ミラーに X線を入射させる X線入射工程と、

前記 X線ミラーから出射する X線を用いて露光を行なう露光工程とを備える、X線露光方法。

【請求項 3 3】 前記 X線をシンクロトロン放射源から出射させる X線出射工程をさらに備える、請求項 3 2 に記載の X線露光方法。

【請求項 3 4】 前記 X線ミラーは、0. 3 n m未満の波長領域の X線を 9 0 %以上吸収する、短波長カット用の X線ミラーを含む、請求項 3 2 または 3 3 に記載の X線露光方法。

【請求項 3 5】 前記 X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される 1 種のミラー材料を含む、請求項 3 2 ～ 3 4 のいずれか 1 項に記載の X線露光方法。

【請求項 3 6】 前記 X線ミラーは、基板と、その基板上に形成された前記ミラー材料を含む層とを備える、請求項 3 5 に記載の X線露光方法。

【請求項 3 7】 前記 X線入射工程は、前記 X線ミラーを用いて X線を集光する工程を含む、請求項 3 2 ～ 3 6 のいずれか 1 項に記載の X線露光方法。

【請求項 3 8】 前記 X線入射工程は、前記 X線ミラーを用いて、前記 X線ミラーから出射する X線を一度に照射できる領域の面積を拡大する工程を含む、請求項 3 2 ～ 3 7 のいずれか 1 項に記載の X線露光方法。

【請求項 3 9】 前記 X線入射工程は、集光ミラーを用いて X線をさらに集光する工程を含む、請求項 3 2 ～ 3 8 のいずれか 1 項に記載の X線露光方法。

【請求項 4 0】 前記 X線入射工程は、前記 X線ミラーから出射する X線を一度に照射できる領域の面積を拡大ミラーを用いて拡大する工程を含む、請求項

3 2 ~ 3 9 のいずれか 1 項に記載の X 線露光方法。

【請求項 4 1】 前記 X 線入射工程では、X 線が入射する面が機械的に研磨されている前記 X 線ミラーを用いる、請求項 3 2 ~ 4 0 のいずれか 1 項に記載の X 線露光方法。

【請求項 4 2】 前記 X 線入射工程では、X 線が入射する面が化学的に研磨されている前記 X 線ミラーを用いる、請求項 3 2 ~ 4 0 のいずれか 1 項に記載の X 線露光方法。

【請求項 4 3】 X 線マスクを用い、前記 X 線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成された X 線吸収体とを含み、

前記メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される 1 種を含む、請求項 3 2 ~ 4 2 のいずれか 1 項に記載の X 線露光方法。

【請求項 4 4】 X 線マスクを用い、前記 X 線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成された X 線吸収体とを含み、

前記メンブレンは、X 線について 0. 4 5 n m 未満の波長領域および 0. 7 n m 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、

前記 X 線吸収体は、0. 6 n m 以上 0. 8 5 n m 未満の波長領域において吸収端を有する材料を含む、請求項 3 2 ~ 4 2 のいずれか 1 項に記載の X 線露光方法。

【請求項 4 5】 前記 X 線吸収体は積層された第 1 層と第 2 層とを含む、請求項 4 3 または 4 4 に記載の X 線露光方法。

【請求項 4 6】 前記第 1 層に含まれる第 1 材料は、前記第 2 層に含まれる第 2 材料の原子量よりも大きな原子量を有する、請求項 4 5 に記載の X 線露光方法。

【請求項 4 7】 前記 X 線入射工程では複数の前記 X 線ミラーを用いる、請求項 3 2 ~ 4 6 のいずれか 1 項に記載の X 線露光方法。

【請求項 4 8】 前記 X 線ミラーを 2 枚以上 4 枚以下用いる、請求項 4 7 に記載の X 線露光方法。

【請求項 4 9】 前記 X 線入射工程では、複数の前記 X 線ミラーのうち最後に X 線が到達する X 線ミラーから出射する X 線の出射方向が、複数の前記 X 線ミラーのうち最初に X 線が到達する X 線ミラーに入射する X 線の入射方向とほぼ同一である、請求項 4 7 または 4 8 に記載の X 線露光方法。

【請求項 5 0】 前記 X 線入射工程は、
前記 X 線ミラーの位置を調節する工程と、
前記 X 線ミラーにおける X 線が入射する面と X 線の入射方向との角度を調節する工程とを含む、請求項 4 7 ～ 4 9 のいずれか 1 項に記載の X 線露光方法。

【請求項 5 1】 前記 X 線入射工程は、
複数の前記 X 線ミラーのうち最後に X 線が到達する X 線ミラーから出射する X 線の出射光軸が、複数の前記 X 線ミラーのうち最初に X 線が到達する X 線ミラーに入射する X 線の入射光軸とほぼ同一である、請求項 4 7 または 4 8 に記載の X 線露光方法。

【請求項 5 2】 前記 X 線入射工程は、前記出射光軸をほぼ同一に保った状態で、

前記 X 線ミラーの位置を調節する工程と、
前記 X 線ミラーにおける X 線が入射する面と X 線の入射方向との角度を調節する工程とを含む、請求項 5 1 に記載の X 線露光方法。

【請求項 5 3】 前記 X 線入射工程は、前記 X 線ミラーから出射する X 線のピーク波長を変更する工程をさらに備える、請求項 5 0 または 5 2 に記載の X 線露光方法。

【請求項 5 4】 シンクロトロン放射源と、複数の X 線ミラーを含み前記シンクロトロン放射源から出射される放射光が入射する X 線ミラー群とを備えるシンクロトロン放射装置であって、

前記 X 線ミラーは、X 線について 0. 4 5 nm 未満の波長領域および 0. 7 nm 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、

前記シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射方向と、前記 X 線ミラー群から出射する反射光の出射方向とがほぼ同一である、シンクロトロン放射装

置。

【請求項 5 5】 前記シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射光軸と、前記 X 線ミラー群から出射する反射光の出射光軸とがほぼ同一である、請求項 5 4 に記載のシンクロトロン放射装置。

【請求項 5 6】 シンクロトロン放射源と、複数の X 線ミラーを含み前記シンクロトロン放射源から出射される放射光が入射する X 線ミラー群とを備えるシンクロトロン放射装置を用いたシンクロトロン放射方法であって、

シンクロトロン放射源から出射した放射光を、X 線について 0. 4 5 n m 未満の波長領域および 0. 7 n m 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含む X 線ミラーに入射させる放射光入射工程と、

前記 X 線ミラー群から、前記シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射方向とほぼ同一の方向に反射光を出射する反射光出射工程とを備える、シンクロトロン放射方法。

【請求項 5 7】 前記シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射光軸と、前記 X 線ミラー群から出射する反射光の出射光軸とがほぼ同一である、請求項 5 6 に記載のシンクロトロン放射方法。

【請求項 5 8】 メンブレンと、そのメンブレン上に形成された X 線吸収体とを備え、

前記メンブレンは、X 線について 0. 4 5 n m 未満の波長領域および 0. 7 n m 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、

前記 X 線吸収体は、0. 6 n m 以上 0. 8 5 n m 未満の波長領域において吸収端を有する材料を含む、X 線マスク。

【請求項 5 9】 請求項 5 8 に記載の X 線マスクを含む、X 線露光装置。

【請求項 6 0】 請求項 3 2 に記載の X 線露光方法を用いて製造された半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

この発明は、X線露光装置、X線露光方法、X線マスク、X線ミラー、シンクロトロン放射装置、シンクロトロン放射方法および半導体装置に関し、より特定のには、従来より短波長領域のX線を露光に用いることが可能なX線露光装置、X線露光方法、X線マスク、X線ミラー、シンクロトロン放射装置、シンクロトロン放射方法および半導体装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

近年、半導体装置の高集積化、微細化に対する要求はますます強くなってきている。このため、従来よりも微細な半導体集積回路のパターンを形成する必要性が高まっている。そこで、写真製版加工工程において、従来用いられていた露光光よりもより短波長であるX線を露光光として用いるX線近接露光技術が注目されている。

【0003】

図24は、従来のX線露光装置の構成図である。図24を参照して、X線露光装置は、シンクロトロン放射源101とX線ミラー103と熱除去フィルタ104とベリリウム窓105と窒化珪素膜からなる窓122とX線マスク106と半導体ウェハ109を設置する縦型XYステージ123とから構成されている。シンクロトロン放射源101において発生した放射光102は、X線ミラー103、熱除去フィルタ104、ベリリウム窓105、窒化珪素膜からなる窓122を通り、X線マスク106に到達する。そして、X線マスク106においては、X線吸収体により半導体ウェハ109に転写すべき回路パターンが形成されている。そして、放射光102がX線マスク106を通過することにより、この回路パターンが半導体ウェハ109上に塗布されたレジストに転写される。なお、このようなX線露光装置は、たとえば、NTT R&D Vol. 43, No. 6, p. 501 (1994) に示されている。

【0004】

ここで、放射光102は、X線領域から赤外線領域までの広い範囲にわたる波長を有する連続スペクトル光である。一方、半導体ウェハ109に転写パターンを転写するX線露光工程において必要とされるX線は、ある適当な波長領域のX

線のみが必要とされる。このため、従来のX線露光装置においては、まず、X線ミラー103の反射特性を利用して、波長が約0.7nm以下の短波長のX線成分を吸収カットする。次に、放射光102がベリリウムからなる熱除去フィルタ104を透過する際に、ベリリウム材の特性から、波長が1.5nmより長いX線成分は、ほとんどすべて熱除去フィルタ104により吸収カットされる。

【0005】

このようにして、放射光102は、その波長が0.7～1.5nm程度の範囲となるように調整される。そして、放射光102は、ベリリウム窓105および窒化珪素膜からなる窓122を順次透過していく。この際、ベリリウム窓105や窒化珪素膜からなる窓122での発熱はほとんどない。そして、ベリリウム窓105と窒化珪素膜からなる窓122との間は大気圧のヘリウムにより満たされている。このため、ベリリウム窓105はベリリウム窓105よりも上流側の真空領域と下流側の大気圧領域との隔壁として作用している。そして、熱除去フィルタ104において不要なX線成分をカットしていることにより、ベリリウム窓105の発熱を抑制している。この結果、ベリリウム窓105の機械的強度を保つことが可能となっている。

【0006】

また、窒化珪素膜からなる窓122はヘリウムが充填されている領域と大気との間の隔壁の役割を果たしている。なお、縦型XYステージ123をヘリウム雰囲気中に設置するような装置構成にした場合には、窒化珪素膜からなる窓122は不要となる。

【0007】

そして、X線マスク106には上述のように半導体ウェハに転写するための回路パターンが形成されている。そして、半導体ウェハ109に塗布されたレジストの所定領域に放射光102をX線マスク106を介して照射することにより、この回路パターンを転写する。

【0008】

ここで、従来、X線ミラー103におけるX線を反射する面の材料としては、金や白金などの重金属が用いられてきている。これは、X線ミラー103に対す

る放射光 102 の斜入射角を 2° 程度と比較的大きくしても、露光に用いる X 線の波長である 0.7 nm 前後の波長において、 60% 程度の X 線の反射率が得られるためである。そして、このような金や白金などの材料を用いて集光角の大きな X 線ミラーを作製することにより、より多くの X 線を集光することが検討されている。このようにより多くの X 線を集光することで、露光に用いる X 線の強度を大きくすることができる。この結果、露光工程において高いスループットを得ることが可能となる。

【0009】

また、X 線ミラー 103 の材料として、炭化珪素や溶融石英などを用いることも提案されている。この炭化珪素は、斜入射角を約 1° と比較的浅く設定することにより、X 線の反射率を 90% 程度という大変高い値にすることができる。

【0010】

また、長波長の X 線を吸収カットする熱除去フィルタ 104 の材料としては、ベリリウム薄膜が提案されているが、この他に、窒化珪素やダイヤモンド薄膜を補助的に用いるという提案もなされている。これは、熱線吸収の効率を上げる目的、およびベリリウム薄膜の酸化防止を図るといった目的のためである。

【0011】

また、X 線マスク 106 は、通常、炭化珪素などからなるメンブレンと、このメンブレン上に形成された X 線吸収体とを備える。ここで、炭化珪素が用いられているのは、露光に用いる X 線である、波長が $0.7\text{ nm} \sim 1.5\text{ nm}$ 程度の X 線の吸収率が比較的小さいからである。

【0012】

このように、X 線ミラーにおける X 線を反射する面の材料としては金、白金、炭化珪素、溶融石英などが提案されている。また、窓材としては、ベリリウム、窒化珪素、ダイヤモンドなどが提案されている。ここで、これらのいずれにおいても、従来から最も適していると言われているピーク波長が 0.75 nm 程度の X 線を露光光として用いることを前提としている。

【0013】

ここで、最適な露光光としてピーク波長が 0.75 nm 程度の X 線が適してい

ると言われていた理由は以下のようなものである。

【 0 0 1 4 】

つまり、原理的には、波長の短いX線を用いるほど得られる光学像の解像度は向上し、微細なパターンを形成することが可能である。しかし、X線の波長が短くなるにつれて、X線のエネルギーは大きくなる。その結果、露光工程において半導体ウェハ 1 0 9 上に塗布されたレジストにX線が照射された場合、このレジスト中において光電子が発生する。この光電子の運動エネルギーは、レジストに入射するX線のエネルギーが大きいほど大きくなる。そして、この光電子によりレジストは感光される。その結果、短波長のX線を用いるほど、レジスト内で発生した光電子により感光されるレジストの領域が大きくなってしまうことになる。この結果、この光電子の影響により、レジストに形成されるパターンがぼけてしまうことになる。つまり、この光電子の飛程がそのまま解像限界を決定するとされていた。

【 0 0 1 5 】

このため、この光電子の飛程を考慮して、従来露光に用いるX線の最適ピーク波長は、0. 7 5 n m程度であると言われていた。

【 0 0 1 6 】

このように、光電子の飛程が解像限界を決定すると考えられていたため、従来は、上記のような約0. 7 5 n m程度のピーク波長を有するX線を用いた露光工程によっては、1 0 0 n m以下の線幅または線間間隔を有するパターンは形成できないと言われていた。

【 0 0 1 7 】

このような状況で、X線を用いた露光工程における解像度を向上させるため、従来、低コントラストマスクや、吸収体パターンに縦方向のテーパーをつけるなどの位相シフトマスク、光近接効果補正を施したマスクなどを用いることにより、高解像度化を図るという提案がなされている。しかし、いずれも、解像度を大幅に向上させることは困難であった。

【 0 0 1 8 】

そして、上記のような光電子の飛程の問題が存在するため、露光に用いるX線

の波長をより短波長領域にシフトすることにより、高解像度化を図るという考えは、半導体装置の回路パターンの転写を行なうX線露光の技術分野においては従来検討されていなかった。また、短波長領域のX線を用いる場合には、X線のエネルギーが従来より大きいため、X線がX線マスクのX線吸収体を容易に透過する。そのため、必要なコントラストを得るためには、X線吸収体の膜厚を厚くする必要がありと考えられる。そして、このような場合には、X線が厚い膜厚を有するX線吸収体により形成された転写用パターンを通過する際に、導波管効果によりX線の透過特性が劣化するので、転写される回路パターンの解像度が低下するという問題があった。このため、転写パターンの微細化は困難であるとされていた。

【0019】

なお、短波長のX線による露光技術としては、マイクロマシン技術の分野において、露光波長を0.3nm程度にした例がある。ただし、このように短波長のX線を用いたのは、レジスト中へのX線の透過能を高くすることにより、数ミクロンのパターンを数百ミクロン程度の高さで形成するという、高アスペクトパターン加工を行なうという目的のためである。また、このマイクロマシン技術の分野において要求されているパターン寸法は、上記の半導体装置の分野で求められている要求パターン寸法よりも1桁から2桁以上大きい。また、X線マスクのX線吸収体の厚さも半導体装置の分野で用いられているものより厚い。また、X線マスクの基板もチタンなどの金属を用いている。つまり、上記技術は本発明の技術分野とは全く異なる技術分野に属するものである。さらに、パラジウムターゲットを用いた電子線励起型の点光源を用いた露光装置では、0.415nm～0.44nmという波長領域のX線を用いて露光を行うために、窒化硼素からなる基板上に金めっきにより吸収体を形成したマスクを用いた実験例が報告されている。しかし、この技術もシンクロトロン放射源を用いる本発明とは、基本的に異なる技術分野に属するものである。

【0020】

【発明が解決しようとする課題】

ここで、近年、半導体装置の微細化、高集積化の要求に伴い、デザインルール

が 0. 0 5 μ m 程度の微細なパターンを形成する必要性が明らかになってきた。そして、上記のようなピーク波長が 0. 7 5 n m 程度の X 線を用いた露光工程では、このような線幅または線間間隔が 0. 0 5 μ m レベルの微細パターンを精度よく形成することは困難であると考えられる。

【 0 0 2 1 】

そこで、発明者らは、X 線露光技術の適用限界をより微細領域に広げ、高解像度のパターンを高速に転写する（高いスループットを達成する）ことを目的として、さまざまな実験、研究をおこなった。この結果、後述するように従来よりも短波長領域の X 線を X 線露光工程に用いることが可能であることを発見した。しかし、現在の X 線露光装置は、基本的にピーク波長が 0. 7 5 n m 程度の X 線を露光光として用いることを前提として設計されたものであるため、たとえば 0. 7 n m よりも小さな波長を有する X 線を露光光として有効に使用することが困難であった。

【 0 0 2 2 】

この発明は、上記のような課題を解決するためになされたものであり、本発明の 1 つの目的は、X 線露光に用いる X 線の波長を従来よりも短波長領域にまで広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能であり、かつ高いスループットを達成することが可能な X 線露光装置を提供することである。

【 0 0 2 3 】

本発明のもう 1 つの目的は、X 線露光において用いる X 線の波長を従来よりも短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能で、かつ、高いスループットを実現することが可能な X 線露光方法を提供することである。

【 0 0 2 4 】

本発明のさらにもう 1 つの目的は、X 線露光において用いる X 線の波長を従来よりも短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することができ、かつ、高いスループットを実現することが可能な X 線露光装置に用いる X 線ミラーを提供することである。

【 0 0 2 5 】

、本発明のさらに別の目的は、X線露光において用いるX線の波長を短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能であり、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光装置に用いるX線マスクを提供することである。

【0026】

本発明のさらに別の目的は、X線露光において用いるX線の波長を短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能であり、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光装置に適用可能なシンクロトロン放射装置を提供することである。

【0027】

本発明のさらに別の目的は、X線露光において用いるX線の波長を短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能であり、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光装置に適用可能なシンクロトロン放射方法を提供することである。

【0028】

本発明のさらに別の目的は、X線露光において用いるX線の波長を従来よりも短波長領域に広げることにより、高解像度のパターンを転写することが可能で、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光方法を用いて製造される高集積化された半導体装置を提供することである。

【0029】

【課題を解決するための手段】

この発明の一の局面におけるX線露光装置は、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーを備える（請求項1）。

【0030】

ここで、従来、X線露光においては、レジスト中においてX線照射により発生するグリーンレンジと呼ばれる光電子の飛程が転写パターンの解像限界を決定すると言われていた。そのため、X線露光によっては、線幅または線間間隔が100nm以下のパターンは形成できないと言われていた。

【0031】

しかし、発明者らは、実験的に非化学増幅型のレジストを用いて、50 nmのラインパターンを形成できることを発見した。この場合、光電子は光学像を鈍らせる作用を有するが、解像限界を決定する決定的な要因とはなっていなかった。

【0032】

つまり、光電子により影響を受けたレジスト部分と、X線を直接照射されたレジスト部分との溶解速度比の大きなレジストを用いれば、光電子の飛程は、解像限界を決定する支配要因とならないことを発明者らは発見した。この結果、本発明によるX線露光装置のように、従来よりも短波長領域のX線を露光光として用いることができることを発明者らは見出した。

【0033】

この発明者らの知見から、従来X線露光に用いられていたX線の波長よりも短い波長領域のX線を露光工程に利用することができるので、露光工程において従来よりも高解像度なパターンを転写することができる。

【0034】

本発明においては、具体的には、X線露光装置が、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料、つまり、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収端を有さない材料を含むX線ミラーを備える。このため、従来用いられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるX線ミラーをX線露光装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0035】

また、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、高いスループットを得ることができる。

【0 0 3 6】

また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

【0 0 3 7】

ここで、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線を露光工程に用いるようにしたのは、以下のような理由による。すなわち、X線の波長が0.45 nm未満である場合は、X線に対するレジストの感度がかえって低下し、高解像度の回路パターンを転写することが難しくなる。また、従来より高い解像度の回路パターンを転写すると同時に、従来より高いスループットを実現するためには、従来利用されていた0.7 nm超えの波長領域よりも短波長領域となる0.7 nm以下の波長領域のX線を用いることが効果的であるためである。

【0 0 3 8】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線がシンクロトロン放射源から射出した放射光に含まれていてもよい（請求項2）。

【0 0 3 9】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーが、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーであってもよい（請求項3）。

【0 0 4 0】

この場合、0.3 nm未満の波長領域のX線の吸収率が90%以上であれば、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

【0 0 4 1】

上記一の局面におけるX線露光装置は、前記X線ミラーが、波長が0.45 nm未満のみのX線を吸収する短波長カット用のX線ミラーであってもよい。

【0042】

この場合、従来用いられていた0.75nm程度の波長よりも、より短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるX線ミラーをX線露光装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。このため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0043】

上記一の局面におけるX線露光装置では、上記X線ミラーがX線について0.45nm未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

【0044】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含んでいてもよい（請求項4）。

【0045】

この場合、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45nm以上0.7nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。この結果、0.45nm以上0.7nm以下という波長領域のX線をほとんど本発明によるX線ミラーは吸収しない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45nm以上0.7nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、確実に高いスループットを得ることができる。

【0046】

なお、ベリリウムの吸収端は11.1nmであり、チタンの吸収端は0.249734nm、2.729nmであり、銀の吸収端は0.048589nm、0.32564nm、0.35164nm、0.36999nm、3.082nmおよび3.114nmであり、ルテニウムの吸収端は0.056051nm、0.3835nm、0.4180nm、0.4369nmおよび4.43nmであり、ロジウムの吸収端は0.053392nm、0.3629nm、0.394

25 nm、0.41299 nm および 4.04 nm であり、パラジウムの吸収端は 0.05092 nm、0.3437 nm、0.37228 nm、0.39074 nm および 3.70 nm である。また、窒素の吸収端は 3.099 nm であり、炭素の吸収端は 4.368 nm である。

【0047】

上記一の局面における X 線露光装置では、X 線ミラーが、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい（請求項 5）。

【0048】

この場合、基板として、加工が容易な材料を用いることにより、この基板を予め球面など X 線ミラーに必要な形状となるような加工を施すことができる。この結果、容易に大型で、かつ複雑形状の X 線ミラーを作製することができる。

【0049】

上記一の局面における X 線露光装置では、X 線ミラーが、X 線を集光する機能を有していてもよい（請求項 6）。

【0050】

この場合、短波長カット用の X 線ミラーが、X 線を集光する機能も兼ね備えるので、X 線露光装置の構造をより簡略化することができる。

【0051】

上記一の局面における X 線露光装置では、X 線ミラーが、X 線ミラーから出射する X 線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有していてもよい（請求項 7）。

【0052】

この場合、短波長カット用の X 線ミラーが、X 線ミラーから出射する X 線の投影領域を拡大する拡大ミラーとしての機能を兼ね備えるので、X 線露光装置の構造をより簡略化することができる。

【0053】

上記一の局面における X 線露光装置では、X 線集光ミラーをさらに備えていてもよい（請求項 8）。

【0054】

、この場合、集光ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に調整できるので、より細かな設定を行なうことができる。

【0055】

また、このように、集光ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に備える構成とするため、従来のX線露光装置にこの短波長カット用のX線ミラーを挿入することにより、従来のX線露光装置を、容易に本発明によるX線露光装置へと改造することが可能となる。この結果、従来よりも短波長領域のX線を露光光として用いることができると同時に、本発明によるX線露光装置を実現するためのコストを低減することができる。

【0056】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する拡大ミラーをさらに備えていてもよい（請求項9）。

【0057】

この場合、拡大ミラーと短波長カット用のX線ミラーを別々に調整できるので、より細かな設定を行なうことができる。

【0058】

また、拡大ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に備える構成とすることにより、従来のX線露光装置に、本発明による短波長カット用のX線ミラーを挿入することによって容易に本発明によるX線露光装置を実現することができる。この結果、本発明によるX線露光装置を実現するためのコストを削減することができる。

【0059】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーにおけるX線が入射する面は、機械的に研磨されていてもよい（請求項10）。

【0060】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーにおけるX線が入射する面は、化学的に研磨されていてもよい（請求項11）。

【0061】

。上記一の局面におけるX線露光装置は、X線マスクをさらに備えていてもよい。X線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい（請求項12）。

【0062】

この場合、本発明によるX線マスクのメンブレンとして用いる材料は、従来のメンブレンとして用いられていたシリコン系の材料のように、0.67nm付近の波長領域において吸収端を有していないので、0.45nm以上0.7nm以下の波長領域におけるX線のトータルでの透過率を従来よりも高くすることができる。この結果、より確実に露光工程に要する時間を従来よりも短縮することができるので、露光工程のスループットを従来よりも高くすることができる。

【0063】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線マスクをさらに備えていてもよく、そのX線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよく、X線吸収体は、0.6nm以上0.85nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含んでいてもよい（請求項13）。

【0064】

この場合、メンブレンに含まれる材料は0.45nm以上0.7nm以下の波長領域において吸収端を有さないので、従来よりも短波長領域のX線をX線露光工程において有効に利用することができる。

【0065】

ここで、材料の吸収端波長ではX線の吸収率がピーク値を示すが、この吸収端波長の前後0.15nmという波長領域においても、X線の吸収率は十分大きな値となる。このため、X線吸収体が0.6nm以上0.85nm未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いるX線の波長領域（0.45

n m以上0.7 n m以下)において、露光に用いるX線をこのX線吸収体により確実に遮蔽することができる。また、このような波長領域に吸収端を有する材料をX線吸収体として用いるので、X線吸収体の厚みを薄くすることができる。この結果、X線吸収体により形成される転写用回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このため、従来よりも短波長領域のX線を用いて、微細な回路パターンを確実に転写することができる。

【0066】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線吸収体が、タングステン、タンタル、レニウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

【0067】

ここで、タングステン(W)の吸収端は0.683 n mであり、タンタル(Ta)の吸収端は0.711 n mであり、レニウム(Re)の吸収端は0.656 n mである。

【0068】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線吸収体が、積層された第1層と第2層とを含んでいてもよい(請求項14)。

【0069】

この場合、X線吸収体が複数の層から構成されるので、X線吸収体として用いられる材料の選択の自由度を大きくすることができる。

【0070】

また、X線について吸収ピーク波長の異なる複数の材料をX線吸収体として用いることができるので、広い波長領域のX線を吸収しなければならない場合に、単一の材料を用いた1層のX線吸収体を形成する場合よりも、X線吸収体の膜厚を薄くすることが可能となる。

【0071】

上記一の局面におけるX線露光装置では、第1層に含まれる第1材料が、第2層に含まれる第2材料の原子量よりも大きな原子量を有していてもよい(請求項15)。

【0072】

、この場合、第 1 および第 2 材料のように原子量の異なる元素を含み、複数の層を形成することにより、各層ごとに X 線の吸収ピーク波長を変えることができるので、より広い波長範囲にわたって確実に X 線を吸収することができる。

【0 0 7 3】

また、第 1 材料としてモリブデンやロジウムなどの原子量の大きな重元素を用いてもよい。また、第 2 材料として、炭素やベリリウムなどの原子量の小さい軽元素を用いてもよい。

【0 0 7 4】

このように、重元素と軽元素とを積層するような X 線吸収体を形成するので、確実に X 線を反射することにより遮光できる。そのため、X 線の遮光能力をほぼ同等にする場合には、従来よりも X 線吸収体の膜厚をより薄くする事が出来る。この結果、X 線吸収体に形成される、転写用回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。ここで、アスペクト比とは、X 線吸収体に形成された転写用回路パターンにおいて溝を考えた場合に、溝の底部の幅と溝の深さとの比をいい、底部の幅が一定で、溝の深さが大きくなると、アスペクト比は大きくなる。このようにアスペクト比を小さくできるので、転写用パターンを容易に形成することができると同時に、高い転写精度を実現することができる。

【0 0 7 5】

上記一の局面における X 線露光装置は、X 線ミラーを複数備えていてもよい（請求項 1 6）。

【0 0 7 6】

この場合、露光に用いる X 線の光軸の設定など、X 線露光装置の設計の自由度を大きくすることができる。また、複数の短波長カット用の X 線ミラーを用いることにより、より確実に、露光に用いる X 線から短波長の X 線を除去することができる。

【0 0 7 7】

上記一の局面における X 線露光装置では、X 線ミラーを、2 枚以上 4 枚以下備えていてもよい（請求項 1 7）。

【0 0 7 8】

この場合、2枚のX線ミラーを用いる場合には、このX線ミラーへのX線の斜入射角を調整することにより、この2枚のX線ミラーに入射する前のX線の進行方向と、2枚のX線ミラーから最終的に出射されるX線の進行方向とをほぼ平行にすることができる。また、X線のX線ミラーに対する入射方向とX線ミラーの反射面との角度を調節することにより、露光に用いるX線のピーク波長を調節することができる。

【0079】

また、3枚もしくは4枚のX線ミラーを用いれば、X線ミラーにおけるX線の斜入射角とX線ミラーから最終的に出射されるX線の光軸の位置とを独立して調節することができるので、X線露光装置の設計の自由度をより大きくすることができる。

【0080】

また、従来のX線露光装置に本発明によるX線ミラーを挿入する場合には、従来のX線の光軸を変更することなく、本発明によるX線ミラーを従来のX線露光装置に組込むことが可能となる。

【0081】

また、4枚のX線ミラーを用いる方が、2枚のX線ミラーを用いる場合よりも、変更することができるX線の波長領域をより広げることができる。

【0082】

上記一局面におけるX線露光装置では、複数のX線ミラーのうち最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射方向が、複数のX線ミラーのうち最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射方向とほぼ同一であってもよい（請求項18）。

【0083】

この場合、X線の入射方向とX線の出射方向とをほぼ同一に保持した状態で、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節することができるので、X線の出射方向を変化させることなく、任意の波長のX線を得ることができる。

【0084】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーの位置を調節する機能と

、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備えていてもよい（請求項19）。

【0085】

この場合、X線の出射方向を変化させることなく（X線の進行方向を一定に保った状態で）、X線ミラーにおけるX線に入射する面とX線の入射方向との角度（斜入射角）を任意に選択することができる。この結果、斜入射角を調節することにより、短波長領域のX線がカットされた、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

【0086】

上記一の局面におけるX線露光装置では、複数のX線ミラーのうち最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射光軸が、複数のX線ミラーのうち最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射光軸とほぼ同一であってもよい（請求項20）。

【0087】

この場合、入射光軸と出射光軸とをほぼ同一とした状態で、短波長領域のX線がカットされた、従来よりも短波長領域にピーク波長を有するX線を得ることができる。

【0088】

上記一の局面におけるX線露光装置では、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置を調節する機能と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備えていてもよい（請求項21）。

【0089】

この場合、X線の入射光軸と出射光軸とをほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置および斜入射角を調節することにより、短波長領域のX線がカットされた、任意のピーク波長を有するX線を容易に得ることができる。

【0090】

上記一の局面におけるX線露光装置では、X線ミラーから出射するX線のピーク波長を変更することが可能であってもよい（請求項22）。

【0091】

この場合、X線マスクの材質や、転写される回路パターンに要求される解像度、また、レジストの特性などに、より適合するようにX線のピーク波長を調節することができる。この結果、従来よりもより微細な回路パターンを精度よく形成することが可能となる。

【0092】

この発明の他の局面におけるX線ミラーは、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含む（請求項23）。

【0093】

このため、従来用いられていた0.75nm程度の波長よりも短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるX線ミラーをX線露光装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0094】

また、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45nm以上0.7nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45nm以上0.7nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、高いスループットを得ることができる。

【0095】

また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

【0096】

上記他の局面におけるX線ミラーは、シンクロトロン放射源から出射した放射光に含まれるX線を反射してもよい（請求項24）。

【0097】

上記他の局面におけるX線ミラーは、0.3nm未満の波長領域のX線を90

%以上吸収して短波長をカットしてもよい（請求項25）。

【0098】

この場合、0.3nm未満の波長領域のX線の吸収率が90%以上であれば、露光光に0.3nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

【0099】

上記他の局面におけるX線ミラーは、波長が0.45nm未満のみのX線を吸収することが可能であってもよい。

【0100】

この場合、従来用いられていた0.75nm程度の波長よりもより短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるX線ミラーをX線露光装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。この結果、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0101】

また、短波長領域のX線を利用するので、X線のエネルギーも従来より大きくなる。この結果、X線の照射強度も従来より大きくなるため、露光工程に必要な時間を短縮することができる。この結果、従来よりも高いスループットを容易に実現することができる。

【0102】

上記他の局面におけるX線ミラーは、X線について0.45nm未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

【0103】

上記他の局面におけるX線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含んでいてもよい（請求項26）。

【0104】

。この場合、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。この結果、0.45 nm以上0.7 nm以下という波長領域のX線をほとんど本発明によるX線ミラーは吸収しない。そのため、従来のX線ミラーよりも、上記のような波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、確実に高いスループットを得ることができる。

【0105】

上記他の局面におけるX線ミラーは、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい（請求項27）。

【0106】

この場合、基板を予め球面やその他X線ミラーに求められる必要な形状に加工しておくことにより、容易に大型でかつ任意の複雑形状のX線ミラーを作製することができる。

【0107】

上記他の局面におけるX線ミラーは、X線を集光する機能を有していてもよい（請求項28）。

【0108】

この場合、短波長カット用のX線ミラーが、X線を集光する機能も兼ね備えるので、このようなX線ミラーを備えるX線露光装置の構造をより簡略化することができる。

【0109】

上記他の局面におけるX線ミラーは、X線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有していてもよい（請求項29）。

【0110】

この場合、短波長カット用のX線ミラーが、X線ミラーから出射するX線の投影領域を拡大する拡大ミラーとしての機能を兼ね備えるので、このようなX線ミラーを備えるX線露光装置の構造をより簡略化することができる。

【0111】

上記他の局面におけるX線ミラーでは、X線が入射する面が機械的に研磨され

ていてもよい（請求項 3 0）。

【0 1 1 2】

上記他の局面における X 線ミラーでは、X 線が入射する面が化学的に研磨されていてもよい（請求項 3 1）。

【0 1 1 3】

この発明のもう 1 つの局面における X 線露光方法は、X 線について 0. 4 5 n m 未満の波長領域および 0. 7 n m 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含む X 線ミラーに X 線を入射させる X 線入射工程と、前記 X 線ミラーから出射する X 線を用いて露光を行なう露光工程とを備える（請求項 3 2）。

【0 1 1 4】

この場合、従来用いられていた 0. 7 5 n m 程度の波長よりも短波長領域の X 線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0 1 1 5】

また、本発明における X 線ミラーを構成する材料は、0. 4 5 n m 以上 0. 7 n m 以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来の X 線ミラーよりも、0. 4 5 n m 以上 0. 7 n m 以下の波長領域の X 線をより確実に反射することができるので、十分な X 線の照射強度を確保することができる。この結果、確実に高いスループットを得ることができる。

【0 1 1 6】

また、露光に用いる X 線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X 線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

【0 1 1 7】

上記もう 1 つの局面における X 線露光方法は、X 線をシンクロトロン放射源から出射させる X 線出射工程をさらに備えていてもよい（請求項 3 3）。

【0 1 1 8】

、上記もう 1 つの局面における X 線露光方法では、X 線ミラーが、0. 3 nm 未満の波長領域の X 線を 9 0 % 以上吸収する、短波長カット用の X 線ミラーを含んでいてもよい（請求項 3 4）。

【0 1 1 9】

この場合、露光光に 0. 3 nm 未満の波長を有する短波長の X 線が混入することを、確実に防止できる。この結果、これらの短波長の X 線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

【0 1 2 0】

上記もう 1 つの局面における X 線露光方法では、X 線ミラーが、波長が 0. 4 5 nm 未満のみの X 線を吸収する短波長カット用の X 線ミラーであってもよい。

【0 1 2 1】

この場合、波長が 0. 7 nm よりも大きい X 線を利用していた従来の X 線露光方法よりも、より短波長領域の X 線を利用することができる。この結果、露光に用いる X 線の波長が短くなることにより、従来よりも高い解像度を有する回路パターンを転写することができる。

【0 1 2 2】

また、X 線の波長が短くなることにより、X 線の照射強度を大きくすることができるので、従来よりも高いスループットを得ることができる。

【0 1 2 3】

上記もう 1 つの局面における X 線露光方法では、X 線ミラーが X 線について 0. 4 5 nm 未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

【0 1 2 4】

上記もう 1 つの局面における X 線露光方法では、X 線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される 1 種のミラー材料を含んでいてもよい（請求項 3 5）。

【0 1 2 5】

この場合、本発明によるX線露光方法において用いるX線ミラーは、0.45 nm以上という波長領域において吸収端を有さない。この結果、0.45 nm以上という波長領域においてX線ミラーによりX線が吸収される吸収ピークが存在しないので、より確実にX線の照射強度を確保することができる。

【0126】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線ミラーが、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい（請求項36）。

【0127】

この場合、基板をX線ミラーに要求される形状に予め加工しておくことができるので、複雑な形状のX線ミラーを容易に得ることができる。

【0128】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、X線ミラーを用いてX線を集光する工程を含んでいてもよい（請求項37）。

【0129】

この場合、X線ミラーを用いて、短波長をカットする工程とX線を集光する工程とを同時に行なうことができるので、本発明によるX線露光方法を行なうX線露光装置の構造を簡略化することができる。

【0130】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、X線ミラーを用いて、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する工程を含んでいてもよい（請求項38）。

【0131】

この場合、X線ミラーが、短波長カット機能とX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能とを兼ね備えるので、本発明によるX線露光方法を行なうX線露光装置の構造を簡略化することができる。

【0132】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、集光ミラーを用いてX線をさらに集光する工程を含んでいてもよい（請求項39）。

【0133】

、このため、短波長カット用のX線ミラーと集光ミラーとを独立して用いるので、従来のX線露光装置に本発明によるX線ミラーを挿入することにより、容易に本発明によるX線露光方法を実施することができる。

【0 1 3 4】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大ミラーを用いて拡大する工程を含んでいてもよい（請求項40）。

【0 1 3 5】

この場合、短波長カット用のX線ミラーと拡大ミラーとを独立して用いるので、従来のX線露光方法を行なうためのX線露光装置に、本発明によるX線ミラーを挿入することで、容易に本発明によるX線露光方法を実施することができる。

【0 1 3 6】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、X線が入射する面が機械的に研磨されているX線ミラーを用いてもよい（請求項41）。

【0 1 3 7】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、X線が入射する面が化学的に研磨されているX線ミラーを用いてもよい（請求項42）。

【0 1 3 8】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線マスクを用いてもよく、このX線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい（請求項43）。

【0 1 3 9】

ここで、本発明によるX線マスクのメンブレンにおいて用いる材料は、従来のメンブレンに用いられていたシリコン系の材料とは異なり、0.67 nm付近の波長領域に吸収端を有さない。このため、従来より短波長領域である0.7 nm

以下の波長を有するX線を露光工程において用いる場合に、メンブレンにおいてこれらのX線が吸収されることを防止できる。この結果、十分な露光量を確保することができる。このため、従来のX線マスクを用いる場合よりも、X線のメンブレンにおける透過率を高くすることができるので、高いスループットを確保することができる。

【0140】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線マスクを用いてもよく、このX線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよく、X線吸収体は、0.6nm以上0.85nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含んでいてもよい（請求項44）。

【0141】

この場合、メンブレンに含まれる材料は0.45nm以上0.7nm以下の波長領域において吸収端を有さないので、このような従来よりも短波長領域のX線をX線露光工程において有効に利用することができる。

【0142】

また、材料の吸収端波長においてはX線の吸収率がピーク値を示すが、この吸収端波長の前後0.15nm程度の波長領域においても、X線の吸収率は十分大きな値となる。このため、X線吸収体が0.6nm以上0.85nm未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いるX線の波長領域（0.45nm以上0.7nm以下）において、このX線吸収体により露光に用いるX線を確実に遮蔽することができる。また、このような波長領域に吸収端を有する材料をX線吸収体として用いるので、X線吸収体の厚みを小さくすることができる。この結果、X線吸収体により形成される転写用回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このため、従来よりも短波長領域のX線を用いて、微細な回路パターンを確実に転写することができる。

【0143】

上記もう1つの局面におけるX線露光方法では、X線吸収体が、タングステン

、タンタル、レニウムからなる群から選択される 1 種を含んでいてもよい。

【0 1 4 4】

上記もう 1 つの局面における X 線露光方法では、X 線吸収体が、積層された第 1 層と第 2 層とを含んでいてもよい（請求項 4 5）。

【0 1 4 5】

この場合、X 線吸収体において複数の層を形成するので、X 線吸収体として用いる材料の自由度をより大きくすることができる。また、X 線の吸収ピーク波長の異なる材料を組合せて X 線吸収体を形成すれば、単一材料を用いて X 線吸収体を形成する場合よりも、より薄い膜厚の X 線吸収体により確実に X 線を遮蔽することができる。

【0 1 4 6】

上記もう 1 つの局面における X 線露光方法では、第 1 層に含まれる第 1 材料は、第 2 層に含まれる第 2 材料の原子量よりも大きな原子量を有していてもよい（請求項 4 6）。

【0 1 4 7】

また、第 1 材料として、モリブデンもしくはロジウムなどの比較的原子量の大きな重元素を用いてもよく、第 2 材料として炭素もしくはベリリウムなどの比較的原子量の小さな軽元素を用いることが好ましい。このように、X 線の吸収ピーク波長が異なる材料を用いることにより、より X 線吸収体の膜厚を薄くすることができる。

【0 1 4 8】

上記もう 1 つの局面における X 線露光方法では、X 線入射工程において、複数の X 線ミラーを用いてもよい（請求項 4 7）。

【0 1 4 9】

この場合、複数の X 線ミラーを用いることにより、X 線ミラーでの X 線斜入射角や出射光軸を設計する際の自由度を大きくすることができる。

【0 1 5 0】

また、複数の X 線ミラーを用いることにより、より確実に短波長領域の X 線をカットすることができる。

【0 1 5 1】

上記もう 1 つの X 線露光方法では、X 線入射工程において、2 枚以上 4 枚以下の X 線ミラーを用いてもよい（請求項 4 8）。

【0 1 5 2】

この場合、たとえば 2 枚の X 線ミラーを用いる場合には、X 線ミラーの位置、および X 線の X 線ミラーに対する斜入射角を調節することにより、X 線の X 線ミラーからの出射方向を一定に保った状態で、X 線の X 線ミラーに対する斜入射角を任意に設定することができる。この結果、X 線のピーク波長を任意に変更することができる。

【0 1 5 3】

また、X 線ミラーを 3 枚もしくは 4 枚用いれば、X 線の光軸を変えることなく、X 線ミラーに対する X 線の斜入射角を調節することができる。このため、従来の X 線露光方法が行なわれていた X 線露光装置に本発明による X 線ミラーを挿入することにより、本発明による X 線露光方法を容易に行なうことが可能となる。

【0 1 5 4】

また、3 枚もしくは 4 枚と X 線ミラーの枚数を増やせば、X 線のピーク波長を調節することが可能な波長領域の幅をより広げることができる。

【0 1 5 5】

上記もう 1 つの局面における X 線露光方法では、X 線入射工程において、複数の X 線ミラーのうち、最後に X 線が到達する X ミラーから出射する X 線の出射方向が、複数の X 線ミラーのうち、最初に X 線が到達する X 線ミラーに入射する X 線の入射方向とほぼ同一であってもよい（請求項 4 9）。

【0 1 5 6】

この場合、X 線ミラーの位置および X 線に対する角度を調節することにより、X 線の出射方向を入射方向とほぼ同一にした状態で、任意のピーク波長を有する X 線を得ることができる。

【0 1 5 7】

上記もう 1 つの局面における X 線露光方法では、X 線入射工程が、X 線ミラーの位置を調節する工程と、X 線ミラーにおける X 線が入射する面と X 線の入射方

向との角度を調節する工程とを含んでもよい（請求項 5 0）。

【0 1 5 8】

この場合、X線の出射方向と入射方向とをほぼ同一に保った状態で、任意のピーク波長を有するX線をより確実に得ることができる。

【0 1 5 9】

また、X線ミラーにおけるX線の入射する面とX線の入射方向との角度（斜入射角）を調節することにより、X線のピーク波長を調節することができる。

【0 1 6 0】

上記もう 1 つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーのうち、最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射光軸が、複数のX線ミラーのうち、最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射光軸とほぼ同一であってもよい（請求項 5 1）。

【0 1 6 1】

この場合、X線の出射光軸と入射光軸とをほぼ同一にした状態で、X線のX線ミラーに対する斜入射角を調節すれば、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

【0 1 6 2】

上記もう 1 つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程において、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置を調節する工程と、X線ミラーにおけるX線に入射する面とX線の入射方向との角度を調節する工程とを含んでもよい（請求項 5 2）。

【0 1 6 3】

この場合、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、任意のピーク波長を有するX線を容易に得ることができる。

【0 1 6 4】

上記もう 1 つの局面におけるX線露光方法では、X線入射工程が、X線ミラーから出射するX線のピーク波長を変更する工程をさらに備えていてもよい（請求項 5 3）。

【0 1 6 5】

この場合、X線露光方法において用いるX線マスクや、転写回路パターンに要求される解像度および半導体基板上に塗布されているレジストなどの特性に適応するように、X線のピーク波長を調節することができる。この結果、より高解像度の回路パターンを確実に転写することができる。

【0 1 6 6】

この発明の別の局面におけるシンクロトロン放射装置は、シンクロトロン放射源と、複数のX線ミラーを含みそのシンクロトロン放射源から出射される放射光が入射するX線ミラー群とを備える。X線ミラーは、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射方向と、X線ミラー群から出射する反射光の出射方向とがほぼ同一である（請求項54）。

【0 1 6 7】

このため、従来X線露光に用いられると考えられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を含むシンクロトロン放射光を容易に得ることができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来よりも短波長領域の放射光（X線）を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0 1 6 8】

また、本発明によるシンクロトロン放射装置のX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば高いスループットを得ることができる。また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

【0 1 6 9】

また、シンクロトロン放射源からの放射光の出射方向とX線ミラー群からの反射光の出射方向とをほぼ同一に保持した状態で、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節すれば、任意の波長のX線を得ることができる。

【0 1 7 0】

上記別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射光軸と、X線ミラー群から出射する反射光の出射光軸とがほぼ同一であってもよい（請求項55）。

【0 1 7 1】

この場合、シンクロトロン放射源からの放射光の出射光軸とX線ミラー群からの放射光の出射光軸とをほぼ同一に保持した状態で、短波長領域のX線がカットされた、従来よりも短波長領域にピーク波長を有する放射光（X線）を得ることができる。

【0 1 7 2】

上記別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーがミラー材料としてベリリウムを含んでいてもよい。また、X線ミラーが3枚の平面ミラーを含んでいてもよい。

【0 1 7 3】

上記別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーがミラー材料としてロジウムを含んでいてもよい。

【0 1 7 4】

上記別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーが、ベリリウムを含む3枚の平面ミラーと、ロジウムを含む拡大ミラーおよび集光ミラーとを含んでいてもよい。

【0 1 7 5】

この発明のさらに他の局面におけるシンクロトロン放射方法は、シンクロトロン放射源と、複数のX線ミラーを含みそのシンクロトロン放射源から出射される放射光が入射するX線ミラー群とを備えるシンクロトロン放射装置を用いたシンクロトロン放射方法であって、シンクロトロン放射源から出射した放射光を、X

線について 0.45 nm 未満の波長領域および 0.7 nm 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含む X 線ミラーに入射させる放射光入射工程と、X 線ミラー群から、シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射方向とほぼ同一の方向に反射光を出射する反射光出射工程とを備える（請求項 56）。

【0176】

このため、従来 X 線露光に用いられると考えられていた 0.75 nm 程度の波長よりも短波長領域の X 線を含むシンクロトロン放射光を容易に得ることができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射方法を X 線露光工程に適用すれば、従来よりも短波長領域の放射光（X 線）を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0177】

また、本発明によるシンクロトロン放射方法における X 線ミラーを構成する材料は、0.45 nm 以上 0.7 nm 以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来の X 線ミラーよりも、0.45 nm 以上 0.7 nm 以下の波長領域の X 線をより確実に反射することができるので、十分な X 線の照射強度を確保することができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射方法を X 線露光工程に適用すれば高いスループットを得ることができる。また、露光に用いる X 線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X 線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

【0178】

また、シンクロトロン放射源からの放射光の出射方向と X 線ミラー群からの反射光の出射方向とをほぼ同一に保持した状態で、X 線ミラーに対する X 線の斜入射角を調節すれば、任意の波長の X 線を得ることができる。

【0179】

上記さらに他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、シンクロトロン放射源から出射される放射光の出射光軸と、X 線ミラー群から出射する反射光の出

射光軸とがほぼ同一であってもよい（請求項 5 7）。

【0 1 8 0】

この場合、シンクロトロン放射源からの放射光の出射光軸と X 線ミラー群からの反射光の出射光軸とをほぼ同一に保持した状態で、短波長領域の X 線がカットされた、従来よりも短波長領域にピーク波長を有する放射光（X 線）を容易に得ることができる。

【0 1 8 1】

この発明のさらに別の局面における X 線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成された X 線吸収体とを備える。メンブレンは、X 線について 0. 4 5 n m 未満の波長領域および 0. 7 n m 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含み、X 線吸収体は、0. 6 n m 以上 0. 8 5 n m 未満の波長領域において吸収端を有する材料を含む（請求項 5 8）。

【0 1 8 2】

ここで、従来の X 線マスクは、主にシリコン系の材料を用いていた。そして、これらのシリコン系の材料は、0. 6 7 n m 付近の波長領域において吸収端を有していた。このため、0. 7 n m 以下という波長領域の X 線を X 線露光の露光光として用いる場合には、十分な照射強度を得ることは難しかった。

【0 1 8 3】

しかし、本発明による X 線マスクでは、メンブレンとして 0. 4 5 n m 以上 0. 7 n m 以下の波長領域に吸収端を有さない材料を用いることにより、0. 7 n m 以下の X 線を露光光として用いる場合に、従来の X 線マスクよりも十分な照射強度を得ることができる。この結果、高いスループットを実現することができる。

【0 1 8 4】

また、X 線吸収体として、0. 6 n m 以上 0. 8 5 n m 未満の波長領域において吸収端を有する材料、より好ましくは、ピーク露光波長より少し長波長側に吸収端を有する材料を用いることにより、主要露光波長領域において、X 線吸収体の膜厚を薄くしても、十分なコントラストを得ることができる。これは、以下のような理由による。つまり、材料の吸収端波長においては X 線の吸収率がピーク

値を示すが、この吸収端波長の前後 0.15 nm 程度の波長領域においても、X 線の吸収率は十分大きな値となる。このため、X 線吸収体が 0.6 nm 以上 0.85 nm 未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いる X 線の波長領域（0.45 nm 以上 0.7 nm 以下）において、この X 線吸収体により露光に用いる X 線を確実に遮蔽することができる。この結果、X 線吸収体の厚みを小さくすることができる。その結果、X 線吸収体により形成される転写用回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。そのため、導波管効果などの影響を低減できるので、高解像度の回路パターンを転写することができる。

【0185】

上記さらに別の局面における X 線マスクでは、X 線吸収体が、タングステン、タンタル、レニウムからなる群から選択される 1 種を含んでいてもよい。

【0186】

上記さらに別の局面における X 線マスクでは、メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される 1 種を含んでいてもよい。

この場合、メンブレンとしてダイヤモンドなどの 0.45 nm 以上 0.7 nm 以下の波長領域に吸収端を有さない材料を用いることにより、0.7 nm 以下の X 線を露光光として用いる場合に、従来の X 線マスクよりも十分な照射強度を得ることができる。この結果、高いスループットを実現することができる。

【0187】

上記さらに別の局面における X 線マスクでは、X 線吸収体が、第 1 層と、第 1 層上に形成された第 2 層とを含んでいてもよい。

【0188】

この場合、X 線吸収体を複数の層により構成することで、X 線吸収体として、複数の材料を用いることができる。このため、X 線マスクの設計の自由度を大きくすることができる。

【0189】

また、X 線の吸収ピーク波長のそれぞれ異なる材料を X 線吸収体として用いれ

ば、単一の材料をX線吸収体として用いる場合よりも、より薄い膜厚で必要な波長領域のX線を遮断することができる。この結果、従来よりX線吸収体の膜厚を小さくすることができる。

【0190】

この発明のさらにもう1つの局面におけるX線露光装置は、上記さらに別の局面におけるX線マスクを含む（請求項59）。

【0191】

このため、0.7 nm以下のX線を露光光として有効に利用することができるので、高解像度の回路パターンを転写できると同時に、高いスループットを実現することができる。

【0192】

この発明のもう1つ別の局面における半導体装置は、上記もう1つの局面におけるX線露光方法を用いて製造される（請求項60）。

【0193】

この場合、上記のように本発明によるX線露光方法を用いれば、従来より高解像度の回路パターンを転写することができるので、従来よりさらに高集積化された半導体装置を得ることができる。

【0194】

この発明のまた別の局面におけるシンクロトロン放射装置は、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーを備える。

【0195】

この場合、従来X線露光などのために用いられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0196】

また、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 n

m以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、X線露光工程において高いスループットを得ることができる。

【0197】

また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

【0198】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーが、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーであってもよい。

【0199】

この場合、0.3 nm未満の波長領域のX線の吸収率が90%以上であれば、X線露光に本発明によるシンクロトロン放射装置を用いた場合、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

【0200】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置は、前記X線ミラーが、波長が0.45 nm未満のみのX線を吸収する短波長カット用のX線ミラーであってもよい。

【0201】

この場合、従来用いられていた0.75 nm程度の波長よりも、より短波長領域のX線を得ることができる。この結果、本発明によるX線ミラーをシンクロトロン放射装置において用いれば、従来よりも短波長領域のX線を利用することができる。このため、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0 2 0 2】

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置では、上記X線ミラーが、X線について0. 4 5 nm未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

【0 2 0 3】

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置では、X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含んでいてもよい。

【0 2 0 4】

この場合、本発明によるX線ミラーを構成する材料は、0. 4 5 nm以上0. 7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。この結果、0. 4 5 nm以上0. 7 nm以下という波長領域のX線をほとんど本発明によるX線ミラーは吸収しない。そのため、従来のX線ミラーよりも、0. 4 5 nm以上0. 7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、確実に高いスループットを得ることができる。

【0 2 0 5】

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置では、X線ミラーが、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい。

【0 2 0 6】

この場合、基板として、加工が容易な材料を用いることにより、この基板を予め球面などX線ミラーに必要な形状となるような加工を施すことができる。この結果、容易に大型でかつ複雑形状のX線ミラーを作製することができる。

【0 2 0 7】

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置では、X線ミラーが、X線を集光する機能を有していてもよい。

【0 2 0 8】

この場合、短波長カット用のX線ミラーが、X線を集光する機能も兼ね備える

ので、シンクロトロン放射装置の構造をより簡略化することができる。

【 0 2 0 9 】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーが、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有していてもよい。

【 0 2 1 0 】

この場合、短波長カット用のX線ミラーが、X線ミラーから出射するX線の投影領域を拡大する拡大ミラーとしての機能を兼ね備えるので、シンクロトロン放射装置の構造をより簡略化することができる。

【 0 2 1 1 】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線を集光する集光ミラーをさらに備えていてもよい。

【 0 2 1 2 】

この場合、集光ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に調整できるので、より細かな設定を行なうことができる。

【 0 2 1 3 】

また、このように、集光ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に備える構成とするため、従来のシンクロトロン放射装置にこの短波長カット用のX線ミラーを挿入することにより、従来のシンクロトロン放射装置を、容易に本発明によるシンクロトロン放射装置へと改造することが可能となる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来よりも短波長領域のX線を露光光として用いることができると同時に、本発明によるシンクロトロン放射装置を実現するためのコストを低減することができる。

【 0 2 1 4 】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能を有する拡大ミラーをさらに備えていてもよい。

【 0 2 1 5 】

この場合、拡大ミラーと短波長カット用のX線ミラーを別々に調整できるので

、より細かな設定を行なうことができる。

【0 2 1 6】

また、拡大ミラーと短波長カット用のX線ミラーとを別々に備える構成とすることにより、従来のシンクロトロン放射装置に、本発明による短波長カット用のX線ミラーを挿入することにより、容易に本発明によるシンクロトロン放射装置を実現することができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置を実現するためのコストを削減することができる。

【0 2 1 7】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーにおけるX線が入射する面は、機械的に研磨されていてもよい。

【0 2 1 8】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーにおけるX線が入射する面は、化学的に研磨されていてもよい。

【0 2 1 9】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置は、X線マスクをさらに備えていてもよい。X線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

【0 2 2 0】

この場合、本発明によるX線マスクのメンブレンとして用いる材料は、従来のメンブレンとして用いられていたシリコン系の材料のように、0.67nm付近の波長領域において吸収端を有していないので、0.45nm以上の波長領域におけるX線のトータルでの透過率を従来よりも高くすることができる。この結果、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、より確実に露光工程に要する時間を従来よりも短縮することができるので、露光工程のスループットを従来よりも高くすることができる。

【0 2 2 1】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線マスクを備えて

いてもよく、そのX線マスクは、メンブレンと、そのメンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよく、X線吸収体は、0.6nm以上0.85nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

【0222】

この場合、メンブレンに含まれる材料は0.45nm以上0.7nm以下の波長領域において吸収端を有さないので、本発明によるシンクロトン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来よりも短波長領域のX線をX線露光工程において有効に利用することができる。

【0223】

また、材料の吸収端波長においてはX線の吸収率がピーク値を示すが、この吸収端波長の前後0.15nmという波長領域においても、X線の吸収率は十分大きな値となる。このため、X線吸収体が0.6nm以上0.85nm未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いるX線の波長領域（0.45nm以上0.7nm以下）において、このX線吸収体により露光に用いるX線を確実に遮蔽することができる。また、このような波長領域に吸収端を有する材料をX線吸収体として用いるので、X線吸収体の厚みを小さくすることができる。この結果、X線吸収体により形成される転写用回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このため、本発明によるシンクロトン放射装置をX線露光装置に適用すれば、従来のX線露光工程よりも短波長領域のX線を用いて、微細な回路パターンを確実に転写することができる。

【0224】

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置では、X線吸収体が、タングステン、タンタル、レニウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

【0225】

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置では、X線吸収体が、積層された第1層と第2層とを含んでいてもよい。

【0 2 2 6】

この場合、X線吸収体が複数の層から構成されるので、X線吸収体として用いられる材料の選択の自由度を大きくすることができる。

【0 2 2 7】

また、X線について吸収ピーク波長の異なる複数の材料をX線吸収体として用いることができるので、広い波長領域のX線を吸収しなければならない場合に、単一の材料を用いた1層のX線吸収体を形成する場合よりも、X線吸収体の膜厚を薄くすることが可能となる。

【0 2 2 8】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、第1層に含まれる第1材料が、第2層に含まれる第2材料の原子量よりも大きな原子量を有していてもよい。

【0 2 2 9】

この場合、第1および第2材料のように原子量の異なる元素を含み、複数の層を形成することにより、各層ごとにX線の吸収ピーク波長を変えることができるので、より広い波長範囲にわたって確実にX線を吸収することができる。

【0 2 3 0】

また、第1材料としてモリブデンやロジウムなどの原子量の大きな重元素を用いてもよい。また、第2材料として、炭素やベリリウムなどの原子量の小さい軽元素を用いてもよい。

【0 2 3 1】

このように、重元素と軽元素とを積層するようなX線吸収体を形成することにより、より確実にX線を吸収することができる。そのため、X線の遮光能力をほぼ同等にする場合には、従来よりもよりX線吸収体の膜厚を薄くする事が出来る。この結果、X線吸収体に形成される、転写用パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このようにアスペクト比を小さくできるので、本発明によるシンクロトロン放射装置をX線露光装置に適用すれば、転写用パターンを容易に形成できると同時に、高い転写精度を実現することができる。

【0 2 3 2】

。上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置は、X線ミラーを複数備えていてもよい。

【0 2 3 3】

この場合、露光に用いるX線の光軸の設定など、シンクロトン放射装置の設計の際の自由度を大きくすることができる。また、複数の短波長カット用のX線ミラーを用いることにより、より確実に、露光に用いるX線から短波長のX線を除去することができる。

【0 2 3 4】

上記また別の局面におけるシンクロトン放射装置では、X線ミラーを、2枚以上4枚以下備えていてもよい。

【0 2 3 5】

この場合、2枚のX線ミラーを用いる場合には、このX線ミラーへのX線の斜入射角を調整することにより、この2枚のX線ミラーに入射する前のX線の進行方向と、2枚のX線ミラーから最終的に出射されるX線の進行方向とをほぼ平行にすることができる。また、X線のX線ミラーに対する入射方向とX線ミラーの反射面との角度を調節することにより、露光に用いるX線のピーク波長を調節することができる。

【0 2 3 6】

また、3枚もしくは4枚のX線ミラーを用いれば、X線ミラーにおけるX線の斜入射角とX線ミラーから最終的に出射されるX線の光軸の位置とを独立して調節することができるので、シンクロトン放射装置の設計の自由度をより大きくすることができる。

【0 2 3 7】

また、従来のシンクロトン放射装置に本発明によるX線ミラーを挿入する場合には、従来のX線の光軸を変更することなく、本発明によるX線ミラーを従来のシンクロトン放射装置に組込むことが可能となる。

【0 2 3 8】

また、4枚のX線ミラーを用いる方が、2枚のX線ミラーを用いる場合よりも、変更することができるX線の波長領域をより広げることができる。

【0 2 3 9】

上記一局面におけるシンクロトロン放射装置では、複数のX線ミラーのうち、最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射方向が、複数のX線ミラーのうち、最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射方向とほぼ同一であってもよい。

【0 2 4 0】

この場合、X線の入射方向とX線の出射方向とをほぼ同一に保持した状態で、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節することができるので、X線の出射方向を変化させることなく、任意の波長のX線を得ることができる。

【0 2 4 1】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーの位置を調節する機能と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備えていてもよい。

【0 2 4 2】

この場合、X線の出射方向を変化させることなく（X線の進行方向を一定に保った状態で）、X線ミラーにおけるX線に入射する面とX線の入射方向との角度（斜入射角）を任意に選択することができる。この結果、斜入射角を調節することにより、短波長領域のX線がカットされた、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

【0 2 4 3】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、複数のX線ミラーのうち、最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射光軸が、複数のX線ミラーのうち、最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射光軸とほぼ同一であってもよい。

【0 2 4 4】

この場合、入射光軸と出射光軸とをほぼ同一とした状態で、短波長領域のX線がカットされた、従来よりも短波長領域にピーク波長を有するX線を得ることができる。

【0 2 4 5】

。上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置を調節する機能と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する機能とを備えていてもよい。

【0 2 4 6】

この場合、X線の入射光軸と出射光軸とをほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置および斜入射角を調節することにより、短波長領域のX線がカットされた、任意のピーク波長を有するX線を容易に得ることができる。

【0 2 4 7】

上記また別の局面におけるシンクロトロン放射装置では、X線ミラーから出射するX線のピーク波長を変更することが可能であってもよい。

【0 2 4 8】

この場合、X線マスクの材質や、転写される回路パターンに要求される解像度、また、レジストの特性などに、より適合するようにX線のピーク波長を調節することができる。この結果、従来よりもより微細な回路パターンを精度よく形成することが可能となる。

【0 2 4 9】

この発明のその他の局面におけるシンクロトロン放射方法は、シンクロトロン放射源からX線を出射するX線出射工程と、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラーに前記X線を入射させるX線入射工程とを備える。

【0 2 5 0】

この場合、従来用いられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線をシンクロトロン放射源から取り出すことができるので、この短波長領域のX線をX線露光工程において容易に利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0 2 5 1】

また、本発明におけるX線ミラーを構成する材料は、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、従来のX線ミラ

よりも、0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。この結果、X線露光工程において確実に高いスループットを得ることができる。

【0252】

また、露光に用いるX線の波長を短波長領域へ広げることにより、従来の光強度に短波長成分を加えることができる。このため、X線の強度を大きくすることができるので、露光工程に要する時間を短縮することができる。この結果、従来よりも確実に高いスループットを実現することができる。

【0253】

上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線ミラーが、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収する、短波長カット用のX線ミラーを含んでいてもよい。

【0254】

この場合、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

【0255】

上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線ミラーが、波長が0.45 nm未満のみのX線を吸収する短波長カット用のX線ミラーであってもよい。

【0256】

この場合、波長が0.7 nmよりも大きいX線を利用していた従来のシンクロトン放射方法よりも、より短波長領域のX線を利用することができる。この結果、露光に用いるX線の波長が短くなることにより、従来よりも高い解像度を有する回路パターンを転写することができる。

【0257】

また、X線の波長が短くなることにより、X線の照射強度を大きくすることができるので、従来よりも高いスループットを得ることができる。

【0 2 5 8】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線ミラーがX線について0.45 nm未満という波長領域においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

【0 2 5 9】

この場合、本発明によるシンクロトロン放射方法において用いるX線ミラーは、0.45 nm以上という波長領域において吸収端を有さない。この結果、0.45 nm以上という波長領域においてX線ミラーによりX線が吸収される吸収ピークが存在しないので、より確実にX線の照射強度を確保することができる。

【0 2 6 0】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線ミラーは、ベリリウム、チタン、銀、ルテニウム、ロジウム、パラジウム、これらの窒化物、炭化物、硼化物、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボンおよび窒化硼素からなる群から選択される1種のミラー材料を含んでいてもよい。

【0 2 6 1】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線ミラーが、基板と、基板上に形成されたミラー材料を含む層とを備えていてもよい。

【0 2 6 2】

この場合、基板をX線ミラーに要求される形状に予め加工しておくことができるので、複雑な形状のX線ミラーを容易に得ることができる。

【0 2 6 3】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、X線ミラーを用いてX線を集光する工程を含んでいてもよい。

【0 2 6 4】

この場合、X線ミラーを用いて、短波長のX線をカットする工程とX線を集光する工程とを同時に行なうことができるので、本発明によるシンクロトロン放射方法を行なうシンクロトロン放射装置の構造を簡略化することができる。

【0 2 6 5】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、X

線ミラーを用いて、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する工程を含んでいてもよい。

【0 2 6 6】

この場合、X線ミラーが、短波長カット機能とX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する機能とを兼ね備えるので、本発明によるシンクロトロン放射方法を行なうシンクロトロン放射装置の構造を簡略化することができる。

【0 2 6 7】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、集光ミラーを用いてX線をさらに集光する工程を含んでいてもよい。

【0 2 6 8】

このため、短波長カット用のX線ミラーと集光ミラーとを独立して用いるので、従来のシンクロトロン放射装置に本発明によるX線ミラーを挿入することにより、容易に本発明によるシンクロトロン放射方法を実施することができる。

【0 2 6 9】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、拡大ミラーを用いて、X線ミラーから出射するX線を一度に照射できる領域の面積を拡大する工程を含んでいてもよい。

【0 2 7 0】

この場合、短波長カット用のX線ミラーと拡大ミラーとを独立して用いるので、従来のシンクロトロン放射方法を行なうためのシンクロトロン放射装置に、本発明によるX線ミラーを挿入することで、容易に本発明によるシンクロトロン放射方法を実施することができる。

【0 2 7 1】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、X線が入射する面が機械的に研磨されているX線ミラーを用いてもよい。

【0 2 7 2】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、X線が入射する面が化学的に研磨されているX線ミラーを用いてもよい。

【0 2 7 3】

。上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線マスクを用いてもよく、このX線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素、ベリリウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

【0274】

ここで、本発明によるX線マスクのメンブレンにおいて用いる材料は、従来のメンブレンに用いられていたシリコン系の材料とは異なり、0.67 nm付近の波長領域に吸収端を有さない。このため、従来より短波長領域である0.7 nm以下の波長を有するX線を露光工程において用いる場合に、メンブレンにおいてこれらのX線が吸収されることを防止できる。この結果、十分な露光量を確保することができる。このため、従来のX線マスクを用いる場合よりも、X線のメンブレンにおける透過率を高くすることができるので、高いスループットを確保することができる。

【0275】

上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線マスクを用いてもよく、このX線マスクは、メンブレンと、メンブレン上に形成されたX線吸収体とを含んでいてもよい。メンブレンは、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含んでいてもよく、X線吸収体は、0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域において吸収端を有する材料を含んでいてもよい。

【0276】

この場合、メンブレンに含まれる材料は0.45 nm以上0.7 nm以下の波長領域において吸収端を有さないので、本発明によるシンクロトン放射方法をX線露光工程に適用すれば、従来より短波長領域のX線をX線露光工程において有効に利用することができる。

【0277】

また、材料の吸収端波長においてはX線の吸収率がピーク値を示すが、この吸収端波長の前後0.15 nmという波長領域においても、X線の吸収率は十分大

きな値となる。このため、X線吸収体が0.6 nm以上0.85 nm未満の波長領域に吸収端を有する材料を含んでいれば、露光に用いるX線の波長領域（0.45 nm以上0.7 nm以下）において、このX線吸収体により露光に用いるX線を確実に遮蔽することができる。また、このような波長領域に吸収端を有する材料をX線吸収体として用いるので、X線吸収体の厚みを従来より小さくすることができる。この結果、X線吸収体により形成される転写用回路パターンのアスペクト比を小さくすることができる。このため、本発明によるシンクロトロン放射方法をX線露光方法に適用すれば、従来のX線露光工程よりも短波長領域のX線を用いて、微細な回路パターンを確実に転写することができる。

【0278】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線吸収体が、タングステン、タンタル、レニウムからなる群から選択される1種を含んでいてもよい。

【0279】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線吸収体が、積層された第1層と第2層とを含んでいてもよい。

【0280】

この場合、X線吸収体において複数の層を形成するので、X線吸収体として用いる材料の自由度をより大きくすることができる。また、X線の吸収ピーク波長の異なる材料を組合せてX線吸収体を形成すれば、単一材料を用いてX線吸収体を形成する場合よりも、より薄い膜厚のX線吸収体により確実にX線を遮蔽することができる。

【0281】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、第1層に含まれる第1材料は、第2層に含まれる第2材料の原子量よりも大きな原子量を有していてもよい。

【0282】

また、第1材料として、モリブデンもしくはロジウムなどの比較的原子量の大きな重元素を用いてもよく、第2材料として炭素もしくはベリリウムなどの比較

的原子量の小さな軽元素を用いることが好ましい。このように、X線の吸収ピーク波長が異なる材料を用いることにより、よりX線吸収体の膜厚を薄くすることができる。

【0283】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーを用いてもよい。

【0284】

この場合、複数のX線ミラーを用いることにより、X線ミラーでのX線斜入射角や出射光軸を設計する際の自由度を大きくすることができる。

【0285】

また、複数のX線ミラーを用いることにより、より確実に短波長領域のX線をカットすることができる。

【0286】

上記その他のシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、2枚以上4枚以下のX線ミラーを用いてもよい。

【0287】

この場合、たとえば2枚のX線ミラーを用いる場合には、X線ミラーの位置、およびX線のX線ミラーに対する斜入射角を調節することにより、X線のX線ミラーからの出射方向を一定に保った状態で、X線のX線ミラーに対する斜入射角を任意に設定することができる。この結果、X線のピーク波長を任意に変更することができる。

【0288】

また、X線ミラーを3枚もしくは4枚用いれば、X線の光軸を変えることなく、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節することができる。このため、従来のシンクロトロン放射方法が行なわれていたシンクロトロン放射装置に本発明によるX線ミラーを挿入することにより、本発明によるシンクロトロン放射方法を容易に行なうことが可能となる。

【0289】

また、3枚もしくは4枚とX線ミラーの枚数を増やせば、X線のピーク波長を

調節することが可能な波長領域の幅をより広げることができる。

【0290】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーのうち、最後にX線が到達するXミラーから出射するX線の出射方向が、複数のX線ミラーのうち、最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射方向とほぼ同一であってもよい。

【0291】

この場合、X線ミラーの位置およびX線に対する角度を調節することにより、X線の出射方向を入射方向とほぼ同一にした状態で、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

【0292】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程が、X線ミラーの位置を調節する工程と、X線ミラーにおけるX線が入射する面とX線の入射方向との角度を調節する工程とを含んでいてもよい。

【0293】

この場合、X線の出射方向と入射方向とをほぼ同一に保った状態で、任意のピーク波長を有するX線をより確実に得ることができる。

【0294】

また、X線ミラーにおけるX線の入射する面とX線の入射方向との角度（斜入射角）を調節することにより、X線のピーク波長を調節することができる。

【0295】

上記その他の局面におけるシンクロトロン放射方法では、X線入射工程において、複数のX線ミラーのうち最後にX線が到達するX線ミラーから出射するX線の出射光軸が、複数のX線ミラーのうち最初にX線が到達するX線ミラーに入射するX線の入射光軸とほぼ同一であってもよい。

【0296】

この場合、X線の出射光軸と入射光軸とをほぼ同一にした状態で、X線のX線ミラーに対する斜入射角を調節すれば、任意のピーク波長を有するX線を得ることができる。

【0 2 9 7】

上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線入射工程において、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、X線ミラーの位置を調節する工程と、X線ミラーにおけるX線に入射する面とX線の入射方向との角度を調節する工程とを含んでいてもよい。

【0 2 9 8】

この場合、出射光軸をほぼ同一に保った状態で、任意のピーク波長を有するX線を容易に得ることができる。

【0 2 9 9】

上記その他の局面におけるシンクロトン放射方法では、X線入射工程が、X線ミラーから出射するX線のピーク波長を変更する工程をさらに備えていてもよい。

【0 3 0 0】

この場合、シンクロトン放射方法において用いるX線マスクや、転写回路パターンに要求される解像度および半導体基板上に塗布されているレジストなどの特性に適應するように、X線のピーク波長を調節することができる。この結果、本発明によるシンクロトン放射方法により得られるX線をX線露光工程に適用すれば、より高解像度の回路パターンを確実に転写することができる。

【0 3 0 1】

【発明の実施の形態】

以下、図面に基づいて本発明の実施の形態を説明する。

【0 3 0 2】

(実施の形態 1)

本発明は、基本的にはシンクロトン放射源からX線露光に最適な従来より短波長領域のX線を取り出す装置および方法と、取り出されたX線を露光光として利用するためのX線マスクとから構成されている。図1は、本発明によるX線露光装置の実施の形態1を示す模式図である。図1を参照して、X線露光装置は、シンクロトン放射源1とX線ミラー3と熱除去フィルタ4とベリリウム窓5とX線マスク6とを備える。ここで、熱除去フィルタ4はベリリウムからなり、長

波長領域のX線をカットする機能を有する。また、ベリリウム窓5は、真空領域と大気との隔壁として作用する。X線マスク6には、半導体ウェハ9に転写されるべき転写用回路パターンがX線吸収体により形成されている。

【0303】

シンクロトロン放射源1から出射した放射光2は、X線ミラー3にまず入射する。このときの放射光2の光軸とX線ミラーのX線を反射する面とのなす角を斜入射角7としている。また、X線ミラー3において放射光2を集光する角度を集光角8として示している。そして、X線ミラー3において反射された放射光2は、熱除去フィルタ4、ベリリウム窓5、X線マスクを介して、半導体ウェハ9に到達する。このような放射光2を利用したX線露光方法を用いて、半導体装置を製造することができる。

【0304】

なお、X線ミラー3は、放射光2を集光する集光ミラーとしての機能や、X線ミラー3から出射する放射光2が一度に照射できる領域の面積（照射面積）を拡大する拡大ミラーとしての機能を兼ね備えていてもよい。また、本発明によるX線露光装置は、X線ミラー3とは別に、集光ミラーや拡大ミラーを備えていてもよい。

【0305】

ここで、本発明によるX線露光装置では、X線ミラー3として、シリコンウェハを基板とし、この基板表面に、プラズマCVD法を用いて50 μ mの膜厚のダイヤモンド層を形成したものをを用いた。このダイヤモンド層の表面は機械的に研磨加工されることにより、表面粗度が0.4nm（rms）となっている。なお、ダイヤモンド層の表面は、化学的に研磨加工されていてもよい。

【0306】

そして、このような構造を有するX線ミラー3に対して、斜入射角1°という条件で放射光2を入射し、X線ミラー3のX線反射特性（短波長領域のX線をカットする特性）を評価した。その結果を図2に示す。図2は、X線ミラーの材料についての、X線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

【0307】

ここで、発明者らは、従来よりも短波長領域のX線をX線露光工程において用いることができることを発見した。そして、このような短波長領域のX線を用いたX線露光装置を実現するために、さまざまな検討を行なった。そして、この検討の1つとして、短波長領域のX線を用いた露光に最適なX線を取り出すため、シンクロトロン放射源からX線を取り出すためのビームラインに用いる短波長カット用のX線ミラーの材料について検討を行なった。

【0308】

発明者らは、まず、各種材料表面でのX線の反射特性を検討した。この結果、従来からX線ミラーとして検討されている金や白金などの重元素を用いたミラーにおいても、斜入射角を小さくすることにより、カットされるX線の波長領域を従来よりも短波長領域へと移動させることがある程度は可能であることを確認した。しかし、従来の金や白金などを用いた場合には、0.3～0.5 nmといった波長領域のX線を完全にカットすることはできず、X線ミラーから出射されるX線には、この0.3～0.5 nmという波長領域のX線がかなりの割合で混入していた。このような波長領域のX線が露光に用いるX線に混入することにより、半導体ウェハ上に塗布されたレジストにX線が入射した際、従来よりも多くの光電子を発生させるので、形成されるパターンの精度に悪影響を及ぼす。

【0309】

そこで、発明者らは、このような問題を解決するため、X線ミラーの反射面の材料として、ダイヤモンドや窒化硼素などの、高密度でありかつ原子量も小さい軽元素を含む材料を用いることを考案した。

【0310】

ダイヤモンドや窒化硼素をX線ミラーとして用いる場合には、斜入射角を1°と大きくした場合にも、0.6 nm程度の短波長領域まで、X線を高い反射率で反射することがわかった。そして、0.6 nm以下の短波長領域においては、これらの材料を用いたX線ミラーでは、X線の反射率が急激に低下する。このため、このような短波長領域でのX線の混入を従来の金や白金などを用いた場合よりも小さくすることができる。

【0311】

また、図 2 を参照して、ダイヤモンドおよび窒化硼素のいずれを用いた X 線ミラーにおいても、ほぼ同程度の高い反射率が得られる。

【0 3 1 2】

また、斜入射角を 1° 以下というより小さい角度にすることにより、ダイヤモンドや窒化硼素を用いた X 線ミラーでは、X 線ミラーにおいてカットする波長領域をより短波長側へと移動させることが可能であった。

【0 3 1 3】

また、これらの軽元素からなる材料においては、一度 0.6 nm 程度の波長領域において X 線の反射率が低下した後は、 0.45 nm 未満の短波長領域において反射率が低下したままでほとんど変動しない。このように反射率の変動がないため、放射光から 0.45 nm 未満の短波長領域に属する X 線を従来よりも効果的に除去することができる。つまり、これらの材料を利用すれば、波長が 0.45 nm 未満のみの X 線を吸収する短波長カット用の X 線ミラーを作成することが可能となる。

【0 3 1 4】

また、上記のような軽元素からなる材料は、 0.45 nm 以上 0.7 nm 以下の波長領域に吸収端を有さない。このため、上記材料は上記のような波長領域において吸収ピークを有さない。そのため、これらの材料を X 線ミラーに適用すれば、従来の X 線ミラーよりも、 0.45 nm 以上 0.7 nm 以下の波長領域の X 線をより確実に反射することができる。その結果、十分な X 線の照射強度を確保することができるので、高いスループットを得ることができる。

【0 3 1 5】

また、上記の材料を X 線ミラーに適用すれば、従来用いられていた 0.75 nm 程度の波長よりも短波長領域の X 線を得ることができる。この結果、従来より短波長領域の X 線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。この結果、本発明による X 線露光装置を用いれば、従来よりさらに高集積化された半導体装置を得ることができる。

【0 3 1 6】

また、これらのダイヤモンドや窒化硼素などの材料を研磨した平滑な表面を X

線の反射面として用いることにより、約 9 0 % 程度と、高い反射率を得ることができた。

【 0 3 1 7 】

また、ここで、従来の X 線ミラーについては、平面ミラーや球面ミラー、あるいは非球面ミラーといった形状が提案されている。球面ミラーとしては、シリンドリカルタイプやトロイダルタイプなどが提案されている。また、非球面ミラーとしてはエリプソイダルタイプ、パラボロイドタイプなどが提案されている。これらはいずれも集光効率を高める目的のために考案されたものである。また、加工技術および評価技術さらには設計技術の進歩により、最近では数式で表記できないような非球面のミラー面も検討されてきている。

【 0 3 1 8 】

また、X 線ミラーの基板としては、ガラスのみでなく、高い硬度を有するが脆いため、従来は加工に適さないと考えられていたような材料を用いることも検討されてきている。これは、加工技術の進歩により、このような高硬度の材料を用いて、自由曲面を形成することが可能になってきたことによる。

【 0 3 1 9 】

このため、発明者らは、従来から X 線ミラーの材料として検討されていた溶融石英などの酸化珪素系の材料のほか、炭化珪素、グラファイト、窒化硼素などの材料によっても X 線ミラーの加工を試みた。そして、これらの炭化珪素、グラファイト、窒化硼素により形成した X 線ミラーによっても、斜入射角を調節することにより、0. 6 nm 前後の領域以下の短波長領域の X 線をカットすることができた。しかし、炭化珪素やグラファイトを用いた X 線ミラーにおいては、斜入射角を大変小さくする必要があった。また、X 線ミラーの反射面としてダイヤモンド薄膜を形成した面を用いることも検討した。

【 0 3 2 0 】

ここで、炭化珪素やダイヤモンド材料の形成技術については、近年、CVD 法を用いた形成技術の開発が急速に進んでいる。そのため、従来よりもより大きな炭化珪素やダイヤモンド材料からなる試料を得ることが可能になってきている。このため、この炭化珪素などの材料を、X 線ミラーの材料として検討することが

可能になってきた。

【0 3 2 1】

ダイヤモンド材料からなるバルク材を用いてX線ミラーを形成することができれば、その熱伝導特性などから考えて、良好な特性を有するX線ミラーを得ることができると考えられる。しかし、これらの材料を用いてバルク状の大型ミラーを形成することは工業的にはまだ困難である。そのため、発明者らは、これらの材料を用いて小型の平面ミラーを作製し、その特性を検証した。そして、その特性は予測どおり優れたものであった。

【0 3 2 2】

発明者らは、上記の炭化珪素やダイヤモンド材料などを用いたX線ミラーの検討に際しては、作製工程の容易さなどから、これらの材料をCVD法を用いて薄膜として形成した。そして、この薄膜表面をX線ミラーの反射面として用いることを主に検討した。すなわち、既に所定形状に加工した基板表面に、CVD法を用いてダイヤモンド薄膜を形成する。そして、機械的あるいは化学的な加工を施し、X線ミラーを完成した。

【0 3 2 3】

ここで、X線ミラーの基板としては、比較的加工が容易なグラファイトなどの炭素系材料、珪素酸化物を主体とした結晶やガラス系の材料、加工は困難になるが熱伝導性や照射損傷に対する耐性などの観点から選択された炭化珪素系の材料、および硬度が高く耐熱性に優れるが、比較的脆い窒化硼素などの材料について検討した。そして、これらの材料の表面にCVD法を用いてダイヤモンド薄膜を形成した。

【0 3 2 4】

具体的には、発明者らは、グラファイト、珪素酸化物、炭化珪素、窒化硼素などの基板を約700℃以上に加熱した状態で、CVD法を用いてダイヤモンド薄膜を形成した。この結果、グラファイト、珪素酸化物、炭化珪素、窒化硼素のいずれの材料の表面においても、ダイヤモンド薄膜を形成することが可能であった。

【0 3 2 5】

また、発明者らは、ダイヤモンド薄膜の形成条件について、形成されたダイヤモンド薄膜の表面の平滑性を向上させるため、CVD法のプロセス条件や、基板表面のダイヤモンド生成の発生核密度を増加させるといった基板処理条件などを検討した。しかし、CVD法で形成したダイヤモンド薄膜をそのままX線ミラーとして用いた場合には、十分満足できる程度の特性を得ることは困難であった。

【0326】

このため、発明者らは、基板材料上にダイヤモンド薄膜を形成した後、ダイヤモンド薄膜の表面について、研磨などの加工を施す方法を試みた。加工方法としては、機械的加工による研磨を主に検討した。また、加工時間の短縮などを目的として、化学的研磨についても加工条件の探索を行なった。しかし、機械的加工および化学的加工のいずれの方法を用いても、ダイヤモンド薄膜の表面の加工は困難であった。

【0327】

一方で、グラファイトをX線ミラーとして用いた場合には、斜入射角を非常に小さくする必要があった。そこで、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)と呼ばれる材料をX線ミラーのX線の反射面に用いることを検討した。ダイヤモンドライクカーボンを用いた場合には、ダイヤモンド薄膜に近いX線の反射特性を得ることができた。また、ダイヤモンドライクカーボンは、ダイヤモンド薄膜の製造プロセス条件と類似したプロセス条件であって、より広い条件において薄膜を形成することが可能であった。

【0328】

また、ここでは、シリコン基板上にCVD法で窒化硼素の薄膜を形成したX線ミラーも作製した。この窒化硼素の薄膜を有するX線ミラーについても、斜入射角 1° という条件で反射特性を評価した。その結果も図2に示す。

【0329】

図2を参照して、ダイヤモンド薄膜を有するX線ミラーは、X線の波長が0.6nm付近を境にして、0.6nm以下の短波長領域に属するX線の反射率が急激に低下している。このため、このX線ミラーを用いれば、0.7nm以上という波長領域のX線を用いていた従来のX線露光装置よりも、より短波長のX線を

得られることがわかる。

【0 3 3 0】

また、窒化硼素を用いたX線ミラーについても、反射率が向上する波長の位置はダイヤモンドを用いたX線ミラーよりわずかに長波長側であるが、やはり同様に0.6 nm以上の波長を有するX線を得ることができる。

【0 3 3 1】

(実施の形態2)

本発明の実施の形態1と同様に、シリコン基板上に気相合成法を用いてダイヤモンドライクカーボンの薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。このダイヤモンドライクカーボンを用いたX線ミラーの反射特性を、本発明の実施の形態1と同様に評価した。その結果を図2に示す。

【0 3 3 2】

図2を参照して、ダイヤモンドライクカーボンを用いたX線ミラーの反射特性は、ダイヤモンドを用いたX線ミラーの反射特性と基本的には類似している。ただし、ダイヤモンドライクカーボンの平均密度は3.32であり、ダイヤモンドの平均密度である3.52よりわずかに低い。このため、X線ミラーに対するX線の斜入射角をすべてのX線ミラーについて1°としたこの実施の形態2における測定結果においては、ダイヤモンドライクカーボンを用いたX線ミラーの反射率の立上がり波長は、ダイヤモンドを用いたX線ミラーの場合よりも長波長側にシフトしている。

【0 3 3 3】

そして、上記のダイヤモンドやダイヤモンドライクカーボンなどのように、X線について0.45 nm未満の波長領域および0.7 nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料をX線ミラーの材料として用いれば、0.7 nm以下の波長領域においてX線の照射強度が低下したり、変化するという問題の発生を防止できる。この結果、従来用いられていた0.75 nm程度の波長よりも短波長領域のX線を利用することができる。そのため、従来よりも高解像度な回路パターンを転写することが可能となる。

【0 3 3 4】

。なお、比較例として炭化珪素を用いたX線ミラーについての反射特性データも図2に示している。図2からもわかるように、炭化珪素を用いたX線ミラーでは、0.6 nm付近の波長領域において吸収端が存在するため、この波長領域で一度反射率が低下している。この結果、本発明によるX線ミラーに比べて炭化珪素を用いたX線ミラーは、0.7 nm以下の波長領域においてX線の照射強度が低下することがわかる。

【0335】

また、図2を参照して、本発明によるX線ミラーの材料であるダイヤモンドなどでは、0.3 nm未満の波長領域のX線を90%以上吸収していることがわかる。

【0336】

このため、本発明によるX線ミラーを用いれば、露光光に0.3 nm未満の波長を有する短波長のX線が混入することを、確実に防止できる。この結果、これらの短波長のX線による露光時のレジスト中における光電子の発生を有効に防止できる。このため、光電子による解像度の劣化を防止できる。

【0337】

(実施の形態3)

ゲルマニウムを基板として、この基板表面にスパッタ法を用いて金属チタンの薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。この金属チタンの薄膜の膜厚は約0.5 μ mである。この金属チタンを用いたX線ミラーについて、本発明の実施の形態1と同様に反射特性を評価した。その結果を図2に示す。

【0338】

図2を参照して、X線ミラーに対するX線の斜入射角を1°とした場合、この金属チタンの薄膜を用いたX線ミラーは、基本的には本発明の実施の形態1におけるダイヤモンド薄膜を用いたX線ミラーと同様の反射特性を示している。ただし、金属チタンの薄膜を用いたX線ミラーは、ダイヤモンド薄膜を用いたX線ミラーよりも長波長領域でのX線の反射率が低くなっている。

【0339】

(実施の形態4)

金属、合金あるいはセラミックを基板として用い、この基板上にイオンプレーティング法を用いて窒化チタンの薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。ここでは、炭化珪素を基板として用い、この炭化珪素からなる基板上に窒化チタンの薄膜を形成したX線ミラーについて、本発明の実施の形態1と同様に反射特性を評価した。

【0340】

また、ベリリウムを機械的に加工することにより、X線ミラーを形成した。これらの窒化チタンを用いたX線ミラーとベリリウムを用いたX線ミラーとの反射特性の評価結果を、図2に示す。

【0341】

図2を参照して、窒化チタンを用いたX線ミラーは、斜入射角を 1° とした場合、チタンを用いたX線ミラーよりも反射率の立上がり波長が短波長側へとシフトし、かつ、チタンを用いたX線ミラーよりも高い反射率を示した。

【0342】

また、ベリリウムを用いたX線ミラーは、 0.8 nm 以上の波長を有するX線に対し、高い反射率を示した。なお、図2に示すように、他の材料と同様に、ベリリウムは反射率が低下した後、短波長領域においてはその反射率は安定している。このため、ベリリウムをX線ミラーの材料として用いることで、他の材料と同様に効果的に短波長領域のX線を除去することができる。また、 0.8 nm 以上の波長領域における高い反射率から考えると、X線ミラーの材料としては優れた特性を有しているといえる。

【0343】

しかし、ダイヤモンド薄膜や窒化硼素などを用いたX線ミラーと同様のカット波長を実現するためには、 1° よりもさらに小さな斜入射角とする必要がある。このため、大きな斜入射角においては用いることができないので、X線を集光する集光ミラーとしての機能を考えた場合には、ダイヤモンド薄膜を用いたX線ミラーよりもトータルの特性としては劣っているといえる。そして、このベリリウムを用いたX線ミラーをX線露光装置において用いる場合に、高いスループットを実現するためには、このX線ミラーの枚数を増加するなどの対応が必要となる

と考えられる。

【0 3 4 4】

このように、短波長カット用のX線ミラーとして、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素などの表面を用い、このX線ミラーへのX線の入射角を調整することにより、従来最適露光波長であるとされていた0.7 nmよりも短波長の領域にピーク波長を有するX線を得ることができる。この結果、従来より短波長のX線を用いた近接露光工程に使用することができるX線を取り出すことができる。

【0 3 4 5】

このため、従来より短波長のX線を露光工程に利用できるので、従来よりも高い解像度を有する回路パターンを転写することができる。また、X線の照射強度も大きくできるので、高いスループットを実現することができる。

【0 3 4 6】

また、基板材料上にダイヤモンドなどのミラー材料を形成するので、基板材料を予め球面などのX線ミラーとして必要な形状となるように加工しておくことができる。この結果、容易に大型でかつ複雑形状のX線ミラーを得ることができる。

【0 3 4 7】

また、本発明によるX線露光装置においては、上記のようなX線ミラーを用いることにより、0.3～1.5 nm程度の範囲の波長を有するX線を露光光として用いることが可能となる。

【0 3 4 8】

(実施の形態5)

X線ミラーの基板として炭化珪素あるいは酸化珪素を用い、この基板表面を研磨した。その後、この研磨面に電子線蒸着法を用いてルテニウムの薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。また、基板の研磨面に電子線蒸着法を用いてロジウムの薄膜を形成することにより、もう1つのX線ミラーを作製した。そして、このルテニウムとロジウムとを用いたX線ミラーについて、本発明の実施の形態1と同様にX線についての反射特性を評価した。なお、この実施の形態

5においては、斜入射角を変化させ、この斜入射角と反射特性との関係についても評価した。その結果を図3に示す。図3は、X線ミラーについてのX線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。なお図3においては、比較例として白金を用いたX線ミラーについての反射特性の測定結果も同時に示している。

【0349】

ここで、ルテニウムにおいては、K吸収端が0.056051nmと短波長領域に存在し、L吸収端が0.4180nmと0.4369nmとに、またM吸収端が4.43nmに存在する。また、ロジウムにおいては、K吸収端が0.053392nmに存在し、L吸収端が0.3629nm、0.3925nmおよび0.41299nmに、またM吸収端が4.04nmに存在する。

【0350】

このようなL吸収端の影響により、図3を参照して、ルテニウムを用いたX線ミラーおよびロジウムを用いたX線ミラーのいずれのデータにおいても、X線の波長が0.4nm付近という領域において、X線の反射率の変動する領域が存在する。しかし、0.45nm以上の波長領域におけるX線ミラーからの反射光においては、これらの吸収端の影響は少なく、良好な特性のX線を得ることができる。つまり、X線について0.45nm未満0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料（0.45nm以上0.7nm以下の波長領域には吸収端を有さない材料）である、ルテニウムやロジウムをX線ミラーの材料として用いれば、0.45nm以上という波長領域のX線をほとんど吸収しない本発明によるX線ミラーを容易に形成することができる。そして、本発明によるX線ミラーは、従来のX線ミラーよりも、0.45nm以上の波長領域のX線をより確実に反射することができるので、十分なX線の照射強度を確保することができる。

そして、X線のX線ミラーに対する斜入射角を1.5°から1.0°へと小さくすれば、得られるX線のピーク波長をより短波長側へと移動させることができる。そして、このようなX線ミラーを用いれば、ピーク波長を0.4nm台としたX線を容易に得ることができる。

【0351】

ここで、図3を参照して、比較例として示した白金は、金などと同様に、K吸収端およびL吸収端が0.1nm程度以下と短波長領域に位置している。しかし、この白金は、さらに0.5nm台の波長領域にM吸収端が存在している。

【0352】

このため、白金を用いたX線ミラーの反射特性を示すグラフは、0.5nm台の波長領域において反射率が低下している。そして、0.4~0.7nmという波長領域における反射率は、本発明によるルテニウムなどを用いたX線ミラーよりもはるかに小さいものになっている。また、白金を用いたX線ミラーでは、この波長領域における反射率がいくつかのピークを有しており、露光工程において用いる露光光としてはあまり良い特性を有しているとはいえない。また、トータルのX線の光量も本発明によるX線ミラーを用いた場合よりも少なくなっていることがわかる。

【0353】

(実施の形態6)

X線ミラーの基板として炭化珪素を用い、この炭化珪素の反射面となる面を研磨する。そして、この基板の研磨面に、電子線蒸着法を用いて銀の薄膜を形成することにより、X線ミラーを作製した。また、同様の基板を用いて、研磨面に電子線蒸着法を用いてパラジウムの薄膜を形成することにより、もう1つのX線ミラーを作製した。そして、これらのX線ミラーについて、本発明の実施の形態1と同様に、斜入射角を1°とした場合の反射特性を評価した。その結果を図4に示す。図4は、X線ミラーについてのX線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

【0354】

図4を参照して、本発明によるX線ミラーである銀およびパラジウムを用いたX線ミラーは、およそ0.4nm付近の波長領域において反射率の立上がりを行っている。そして、0.45~0.7nmといった波長領域のX線については、安定した反射率をしている。このため、本発明による銀およびパラジウムを用いたX線ミラーを用いれば、本発明の実施の形態1~5と同様に、従来よりも短波長領域にピーク波長を有し、X線露光工程に適するX線を容易に得ることができ

る。

【0355】

また、比較のために示した白金を用いたX線ミラーの反射特性と比較してもわかるように、従来の白金を用いたX線ミラーよりも、本発明によるX線ミラーの方が、0.45～0.7nmという波長領域のX線に対しては、高い反射率を示していることがわかる。

【0356】

なお、ここでは炭化珪素を基板材料として用いたが、酸化珪素を基板材料として用いた場合にも、同様の効果を得られる。

【0357】

(実施の形態7)

本発明のように、従来よりも短波長のX線を用いて微細パターンを形成する場合には、X線マスクの基板材料におけるX線の透過性能も重要な特性の1つである。具体的には、X線マスクの基板材料において、X線の透過性能がX線の波長に対する依存性を有することが問題となる。

【0358】

すなわち、従来からX線マスクの基板として検討されている窒化珪素や炭化珪素などの珪素を含む材料は、薄膜中の欠陥レベルなどを含め、実用に向けた完成度は非常に高く、この点においては好ましい材料である。しかし、珪素はX線についての吸収端が0.7nm近辺の波長領域に存在するので、この波長領域近辺のX線に対して、急激な透過率の変化が発生する。この結果、本発明において使用しようとする短波長領域のX線を露光光として用いる場合には、従来の珪素を含む材料はX線マスクの基板として用いるには適しているとは言えなかった。

【0359】

このため、発明者らは、珪素を含有しない薄膜をX線マスクの基板として用いることを検討した。具体的には、カーボンを主原料とする材料、窒化硼素およびベリリウムなどの軽元素で構成された薄膜を用いることを検討した。上記した材料はいずれも1.5nm以下の波長において吸収端が存在せず、X線に対する良好な透過性能を示す。特に、ダイヤモンドはヤング率についても炭化珪素の2倍

以上の値を示すなど、X線マスクの基板としての特性は極めて優れている。

【0 3 6 0】

また、ベリリウム薄膜は、X線の透過性能は極めて優れているものの、アライメント用の光についての透過性がなく、熱膨張係数も大きかった。このため、ベリリウム薄膜は、X線を用いた近接露光技術においては、X線マスクの基板としてほとんど検討されていなかった。

【0 3 6 1】

しかし、現在開発が進められている減圧ヘリウム雰囲気などの熱放散性のよい露光環境を用いること、およびフラッシュ露光のような大面積一括露光方式を用いることなどの条件下においては、露光工程におけるX線マスクの温度上昇は極めて小さいことがわかった。特に、熱線吸収用のダイヤモンド窓やベリリウム窓をX線露光装置において用いた場合には、X線マスクの温度上昇はほとんど無視し得る程度であった。この結果、ベリリウム薄膜の熱膨張係数が大きいという問題は、大きな障害とはならないことがわかった。

【0 3 6 2】

また、X線マスクのアライメント方式として、X線マスクを通して半導体ウェハ上に形成されたマークを検出するというような方式以外のアライメント方法、たとえばグローバルアライメント方式を用いる場合には、ベリリウム薄膜における光の透過性が悪いということは問題とならない。ここで、グローバルアライメント方式とは、たとえば、まずX線マスクとX線マスクのホルダとの位置を予め調整する。そして、ホルダと半導体ウェハとの位置を調節する。そして、露光ショットごとにX線マスクのアライメントは行なわず、ホルダの移動を精密に制御することにより、X線マスクと半導体ウェハとの位置合せを行なう方法などが該当する。

【0 3 6 3】

また、窒化硼素は、硬度や熱膨張係数の値などから考えると、ベリリウム薄膜よりもX線マスクの基板として優れている。しかし、ベリリウム薄膜と同様、アライメントに用いる光を透過する膜を形成することが困難であったため、従来はX線マスクの基板材料としては検討されていなかった。しかし、ベリリウム薄膜

の場合と同様に、グローバルアライメント方式を用い、半導体ウェハを保持するステージの位置精度の高精度化が進められた結果、この窒化硼素もX線マスクの基板材料として用いることが可能であることがわかった。また、窒化硼素は、本発明において露光光として用いるX線の0.5 nmという波長領域において、吸収端が存在しない優れた材料であることも明らかになった。すなわち、これらの材料は、本発明によるX線露光装置においては、X線マスクの基板材料として適用することが可能である。

【0364】

このように、本発明によるX線露光装置において用いるX線マスクのメンブレン材料（ベリリウム、ダイヤモンド、ダイヤモンドライクカーボン、窒化硼素）について、X線の透過特性を評価した。その結果を図5に示す。

【0365】

図5は、メンブレン材料についてのX線の波長とX線の透過率との関係を示すグラフである。また、比較のため、従来からX線マスクのメンブレンとして用いられる炭化珪素についても、同様にX線の透過特性を示した。図5を参照して、本発明によるX線マスクのメンブレン材料は、従来用いられていた炭化珪素よりも、0.45～0.7 nmという波長領域において優れたX線の透過率を示すことがわかる。

【0366】

なお、各種材料についてのX線の透過特性の評価は、何点かの波長に対してトータル光量の測定を行ない、透過率のX線波長に対する依存性についての詳細な検討はシミュレーションにより行なった。

【0367】

（実施の形態8）

以下、本発明によるX線ミラーを既存のX線露光装置に挿入することによって、短波長領域のX線を確実にカットすることができるという効果を得ることが可能であることを説明する。

【0368】

従来のX線露光装置の系として、臨界波長が0.7 nmというシンクロトロン

放射源と、2枚の金を含むX線ミラーと、厚さ20 μm のベリリウム窓とを備える系を考える。このシンクロトロン放射源から出射したX線は、斜入射角 1.4° という条件で金を含むX線ミラーにおいて反射される。そして、その後、ベリリウム窓を透過することにより、長波長成分をカットする。このようにして得られるX線のスペクトルを図6に示す。図6は、X線の波長とX線の相対強度との関係を示すグラフである。図6を参照して、図中の実線で示したグラフは上記の従来のX線露光装置において得られるX線のスペクトルを示す。

【0369】

このような従来のX線露光装置に、まずダイヤモンドを含む本発明によるX線ミラーを、斜入射角が 1° となる条件で挿入する。ここでは、本発明によるX線ミラーを1枚挿入した場合と、2枚挿入した場合との両方の場合について、X線のスペクトルをそれぞれ示している。

【0370】

図6からもわかるように、従来の系においてベリリウム窓を透過した後も残存していた0.55 nm以下の短波長成分が、本発明によるX線ミラーを挿入することにより、ほとんどカットされていることがわかる。そして、本発明によるX線ミラーを2枚追加した場合には、本発明によるX線ミラーを1枚追加した場合に比べて、全体のX線の強度は若干弱くなるものの、ピーク波長をほぼ一定にしたまま、0.55 nm以下の波長領域のX線の強度をより低減させることが可能であることがわかる。

【0371】

(実施の形態9)

以下、本発明によるX線ミラーを用いて、露光に用いるX線のピーク波長を連続的に変更することが可能であることを説明する。

【0372】

ここで、X線露光装置の系として、本発明の実施の形態8において検討したX線露光装置の系と同様の系を考える。ただし、本発明の実施の形態9においては、実施の形態8における系と異なり、金を用いたX線ミラーは用いず、始めから本発明によるダイヤモンドを用いたX線ミラーを2枚用いる。そして、この2枚

のX線ミラーに対するX線の斜入射角を $0.6 \sim 1.5^\circ$ と変化させた場合の、ベリリウム窓を透過した後のX線のスペクトルを図7に示す。ここで、図7は、X線の波長とX線の相対強度との関係を示すグラフである。

【0373】

図7を参照して、X線ミラーに対するX線の斜入射角を調節することにより、得られるX線のピーク波長を連続的に変化させることができる。

【0374】

(実施の形態10)

本発明の実施の形態8および9におけるX線ミラーの制御方法において、X線の光軸の方向を変えることなく、X線ミラーに対するX線の斜入射角を変更することが可能なシステムについて説明する。

【0375】

図8は、本発明によるX線ミラーを2枚用いた系での制御方法を示す模式図である。図8を参照して、X線10は、1段目X線ミラー11に対して斜入射角 α で入射している。そして、1段目X線ミラー11において反射されたX線10は、2段目X線ミラー12にやはり斜入射角 α で入射し、反射される。

【0376】

このときの1段目X線ミラー11と2段目X線ミラー12とのx軸方向の距離を L_α 、y軸方向の距離をDとする。なお、1段目X線ミラー11は、設置位置が固定されており、紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を備える。また、2段目X線ミラー12は、x軸方向に移動可能であり、かつ、1段目X線ミラー11と同様に、紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を有する。図8に示すように、1段目X線ミラー11と2段目X線ミラー12とにおけるX線10の斜入射角を同一にすることにより、2段目X線ミラー12から出射するX線10の光軸は、1段目X線ミラー11に入射するX線10の光軸とほぼ平行となる。

【0377】

次に、1段目X線ミラー11に対するX線10の斜入射角を β と α より大きくした場合には、1段目X線ミラー11と2段目X線ミラー12とのx軸方向の距離を L_β とし、2段目X線ミラー12におけるX線の斜入射角を β とすることに

より、やはり 2 段目 X 線ミラー 1 2 から出射する X 線 1 0 の光軸を 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の光軸とほぼ平行とすることができる。

【0 3 7 8】

このとき

【0 3 7 9】

【数 1】

$$D = L\alpha \times \tan(2\alpha) = L\beta \times \tan(2\beta)$$

【0 3 8 0】

という関係が成り立つ。

このため、X 線 1 0 の光軸の方向を変更すること無く、本発明の実施の形態 9 と同様に X 線のピーク波長を連続的に変化させることが可能となる。

【0 3 8 1】

(実施の形態 1 1)

図 9 は、本発明による X 線ミラーを 3 枚用いた系の制御方法を示す模式図である。1 段目 X 線ミラー 1 1 と 2 段目 X 線ミラー 1 2 との x 軸方向の距離は L という一定値である。また、2 段目 X 線ミラー 1 2 と 3 段目 X 線ミラー 1 3 との x 軸方向の距離も同様に L という一定値である。1 段目 X 線ミラー 1 1 は、位置が固定されており、紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を有する。2 段目 X 線ミラー 1 2 は、y 軸方向に平行移動する機能を有している。3 段目 X 線ミラー 1 3 は、1 段目 X 線ミラー 1 1 と同様に紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を備えている。

【0 3 8 2】

X 線 1 0 が 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する際の斜入射角が α の場合、1 段目 X 線ミラー 1 1 と 2 段目 X 線ミラー 1 2 との間の y 軸方向の距離を $D\alpha$ とする。そして、3 段目 X 線ミラー 1 3 への X 線 1 0 の斜入射角が α となるように、3 段目 X 線ミラー 1 3 の角度を制御する。この結果、3 段目 X 線ミラー 1 3 から出射する X 線 1 0 の光軸と 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の光軸とをほぼ同一とすることができる。ただし、2 段目 X 線ミラー 1 2 に対する X 線 1 0 の斜

入射角は 2α となる。

【0383】

次に、1 段目 X 線ミラー 1 1 に対する X 線 1 0 の斜入射角が β となるように 1 段目 X 線ミラー 1 1 を回転させた場合を考える。この場合、2 段目 X 線ミラー 1 2 を y 軸方向に平行移動させる。また、3 段目 X 線ミラー 1 3 において、X 線 1 0 の斜入射角が β となるように 3 段目 X 線ミラー 1 3 を回転させることにより、先ほどと同様に 3 段目 X 線ミラー 1 3 から出射する X 線 1 0 の光軸と 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の光軸とをほぼ同一とすることができる。

【0384】

このように、X 線 1 0 の光軸を同一としたまま、X 線ミラー 1 1、1 2、1 3 に対する X 線の斜入射角を任意に選択することが可能となる。このとき、

【0385】

【数 2】

$$L = \frac{D\alpha}{\tan(2\alpha)} = \frac{D\beta}{\tan(2\beta)}$$

【0386】

という関係が成り立つ。

ここで、1 段目 X 線ミラー 1 1 および 3 段目 X 線ミラー 1 3 としてベリリウムを、2 段目 X 線ミラー 1 2 として窒化チタンをそれぞれ用いた X 線ミラーを使用する場合に得られる X 線のスペクトルを図 1 0 に示す。なお、X 線露光装置の系としては、本発明の実施の形態 8 および 9 と同様に、光源として臨界波長 0. 7 nm のシンクロトロン放射源、X 線取出窓として厚さ 20 μ m のベリリウム窓を用いた系を考える。

【0387】

図 1 0 は、本発明の実施の形態 1 1 における X 線露光装置の系において得られる X 線の波長と X 線の相対強度との関係を示すグラフである。

【0388】

図 1 0 を参照して、1 段目 X 線ミラー 1 1 (図 9 参照) および 3 段目 X 線ミラー 1 3 (図 9 参照) における斜入射角を 0. 5 ~ 0. 75° という範囲で 0. 0

5° ピッチで変化させる。そして、この変化に対応するように、2 段目 X 線ミラー 1 2（図 9 参照）については、1. 0° ～ 1. 5° という範囲を 0. 1° ピッチで変化させている。図 1 0 からわかるように、X 線のピーク波長を連続的に変化させることが可能であることがわかる。

【0 3 8 9】

（実施の形態 1 2）

図 1 1 は、本発明による X 線ミラーを 4 枚用いた系での制御方法を示す模式図である。図 1 1 を参照して、4 枚の X 線ミラーを用いて X 線 1 0 の光軸を変えることなく、X 線ミラーに対する X 線の斜入射角を変更することが可能なシステムについて説明する。

【0 3 9 0】

図 1 1 を参照して、1 段目 X 線ミラー 1 1 と、x 軸方向に一定の距離 L だけ離れた位置に 2 段目 X 線ミラー 1 2 が設置されている。3 段目 X 線ミラー 1 3 は、2 段目 X 線ミラー 1 2 から x 軸方向に L' だけ離れた位置に設置されている。4 段目 X 線ミラー 1 4 は、3 段目 X 線ミラー 1 3 から x 軸方向に一定の距離 L だけ離れた位置に設置されている。1 段目 X 線ミラー 1 1 と 4 段目 X 線ミラー 1 4 とは、位置が固定されており、紙面に垂直な軸を中心とした回転機能を備える。2 段目 X 線ミラー 1 2 と 3 段目 X 線ミラー 1 3 とは、紙面に垂直な軸を中心とする回転機能の他、y 軸方向に移動する機能を備える。

【0 3 9 1】

1 段目 X 線ミラー 1 1 における X 線 1 0 の斜入射角が α の場合、2 段目 X 線ミラー 1 2、3 段目 X 線ミラー 1 3、4 段目 X 線ミラー 1 4 のいずれにおいても X 線の斜入射角が α となるように X 線ミラー 1 2、1 3、1 4 の回転角度および位置を調節する。このときの 1 段目 X 線ミラー 1 1 と 2 段目 X 線ミラー 1 2 との y 軸方向における距離を $D\alpha$ とする。この結果、1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の光軸と 4 段目 X 線ミラー 1 4 から出射する X 線 1 0 の光軸とはほぼ同一となる。

【0 3 9 2】

次に、1 段目 X 線ミラー 1 1 における X 線 1 0 の斜入射角が β となるように 1

段目 X 線ミラー 1 1 を回転させる。このとき、2 段目 X 線ミラー 1 2 と 3 段目 X 線ミラー 1 3 とを y 軸方向に平行移動させる。また、同時に、2 段目 X 線ミラー 1 2 と 3 段目 X 線ミラー 1 3 とにおける X 線の斜入射角が β となるように、それぞれの X 線ミラー 1 2、1 3 を回転する。そして、4 段目 X 線ミラー 1 4 においても、X 線の斜入射角が β となるように 4 段目 X 線ミラーを回転させることにより、先ほどと同様に 4 段目 X 線ミラー 1 4 から出射する X 線 1 0 の光軸と 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の光軸とをほぼ同一とすることができる。すなわち、X 線 1 0 の光軸を保ったまま、X 線ミラー 1 1 ～ 1 4 に対する X 線の斜入射角を任意に選択することが可能となる。このとき、

【0 3 9 3】

【数 3】

$$L = \frac{D\alpha}{\tan(2\alpha)} = \frac{D\beta}{\tan(2\beta)}$$

【0 3 9 4】

という関係が成り立つ。

このため、X 線 1 0 の光軸を変更すること無く、本発明の実施の形態 1 1 と同様に X 線のピーク波長を連続的に変化させることが可能となる。

【0 3 9 5】

(実施の形態 1 3)

図 1 2 は、本発明による X 線ミラーを 4 枚用いたもう 1 つの系での制御方法を示す模式図である。

【0 3 9 6】

図 1 2 を参照して、1 段目 X 線ミラー 1 1 から、x 軸方向に $L\alpha$ だけ間隔を隔てて 2 段目 X 線ミラー 1 2 が設置されている。2 段目 X 線ミラー 1 2 から x 軸方向に $L\beta$ だけ間隔を隔てて 3 段目 X 線ミラー 1 3 が設置されている。3 段目 X 線ミラー 1 3 から x 軸方向に $L\alpha$ だけ間隔を隔てて 4 段目 X 線ミラー 1 4 が設置されている。なお、それぞれの X 線ミラーの間の距離は、それぞれの X 線ミラーでの反射中心の間の距離を示す。

【0 3 9 7】

ここで、1 段目 X 線ミラー 1 1 は、その位置および回転角度も固定されている。2 段目 X 線ミラー 1 2 と 3 段目 X 線ミラー 1 3 とはそれぞれ紙面に対して垂直な軸を中心とした回転機能と、x 軸方向における移動機能を備える。4 段目 X 線ミラー 1 4 は回転角が一定であり、x 軸方向における移動機能を備えている。

【0 3 9 8】

ここで、1 段目 X 線ミラー 1 1 と 4 段目 X 線ミラー 1 4 とにおける X 線の斜入射角を一定値の α とする。なお、この斜入射角 α は、X 線ミラー 1 1、1 4 での X 線の吸収を抑制するため極力小さい値とする。次に、2 段目 X 線ミラー 1 2 と 3 段目 X 線ミラー 1 3 とにおける X 線の斜入射角を β ($\beta > \alpha$) とする。また、2 段目 X 線ミラー 1 2 と 3 段目 X 線ミラー 1 3 との y 軸方向における距離を一定値 D とする。このようにすると、

【0 3 9 9】

【数 4】

$$D = 2 \times L\alpha \times \tan(2\alpha) = L\beta \times \tan 2(\beta - \alpha)$$

【0 4 0 0】

という関係が成り立つ。そして、上記の関係が維持されるように、斜入射角 β 、X 線ミラー間の距離 $L\alpha$ 、 $L\beta$ をそれぞれ調節する。

【0 4 0 1】

ここで、斜入射角 α を非常に小さい角度とすることで、1 段目 X 線ミラー 1 1 および 4 段目 X 線ミラー 1 4 における X 線 1 0 の減衰がほとんどない状態とすることができる。また、4 段目 X 線ミラー 1 4 から出射する X 線 1 0 の光軸と 1 段目 X 線ミラー 1 1 に入射する X 線 1 0 の光軸とをほぼ同一とした状態で、2 段目 X 線ミラー 1 2 および 3 段目 X 線ミラー 1 3 における X 線 1 0 の斜入射角 β を任意に調節することができる。このため、本発明の実施の形態 1 3 における制御方法では、本発明の実施の形態 1 2 と同様に効果を得ることができると同時に、本発明の実施の形態 1 2 よりも X 線の減衰量を小さくすることができる。

【0 4 0 2】

つまり、X 線 1 0 の光軸を変化させることなく、任意のピーク波長を有する X

線を得ることができる。ここで、図 1 2 に示した系において、1 段目から 4 段目までのすべての X 線ミラー 1 1 ~ 1 4 にベリリウムを用いた X 線ミラーを適用した場合に得られる X 線のスペクトルを、図 1 3 に示す。図 1 3 は、本発明の実施の形態 1 3 における X 線の波長と X 線の相対強度との関係を示すグラフである。

【0 4 0 3】

なお、図 1 3 は、1 段目 X 線ミラー 1 1 および 4 段目 X 線ミラー 1 4 における斜入射角 α は 0.5° とし、2 段目 X 線ミラー 1 2 と 3 段目 X 線ミラー 1 3 とにおける X 線の斜入射角を $0.5 \sim 1.0^\circ$ という範囲で変化させた場合の X 線のスペクトルを示している。また、その他の X 線露光装置の構成は、本発明の実施の形態 8 もしくは実施の形態 9 において用いた系と同様である。

【0 4 0 4】

図 1 3 を参照して、X 線のピーク波長を連続的に変更することが可能であることがわかる。

【0 4 0 5】

このように、X 線のピーク波長を任意に変更できるので、用いる X 線マスクや要求される解像度、また使用するレジストの性質などにより適した波長の X 線を使用することができる。

【0 4 0 6】

(実施の形態 1 4)

図 1 4 は、本発明による X 線マスクを示す断面模式図である。図 1 4 を参照して、X 線マスクを説明する。

【0 4 0 7】

図 1 4 を参照して、X 線マスクは基板 1 5 とダイヤモンドメンブレン 1 6 と重元素であるモリブデンの薄膜 1 7 a ~ 1 7 c および軽元素であるカーボンの薄膜 1 8 a、1 8 b からなる X 線吸収体とガードリング 1 9 とを備える。基板 1 5 上にダイヤモンドメンブレン 1 6 が形成されている。ダイヤモンドメンブレン 1 6 上に X 線吸収体としてモリブデン薄膜 1 7 a ~ 1 7 c とカーボン薄膜 1 8 a、1 8 b とがそれぞれ互いに積層するように形成されている。この X 線吸収体には、転写パターン 2 0 が形成されている。転写パターン 2 0 の下に位置する領域には

、基板 1 5 に窓部 2 1 が形成されている。窓部 2 1 においてはダイヤモンドメンブレン 1 6 の裏面が露出している。基板 1 5 下にはガードリング 1 9 が設置されている。ここで、X線吸収体に形成された転写用パターン 2 0 は、電子線描画を用いて形成されたレジストパターンをマスクとしてX線吸収体をエッチングすることにより形成されている。

【0 4 0 8】

ここで、X線吸収体の積層数およびそれぞれの層の厚さは、要求される遮光量、すなわち必要なマスクコントラストに応じて決定される。たとえば、低コントラストマスクとする場合には、図 1 4 に示したように積層数を 5 層と比較的に少なくする。一方、高コントラストとする場合には、積層数を 2 0 層と多くする。なお、積層数は 2 以上ならばその他の積層数でも同様の効果を得ることができる。

【0 4 0 9】

ここで、X線を用いた露光工程においてX線吸収体が遮光しなければならないX線の波長領域は、0. 5 ~ 1 5. nmと広い領域に及ぶ。このため、従来のように単一の材料でX線吸収体を形成する場合に、遮光が必要な波長領域のすべてを十分に遮光するためには、X線吸収体の膜厚を厚くする必要があった。この結果、転写用パターン 2 0 におけるアスペクト比が大きくなり、微細なパターンを形成する場合には不利であった。

【0 4 1 0】

なお、従来からX線マスクにおけるX線の吸収体として提案されている重金属やその化合物、合金などは、本発明において利用しようとする短波長領域のX線に対しても高い吸収能を有している。そのため、X線吸収体を構成する材料としてこれらのタングステンなどの材料を用いることは原理的には可能である。

【0 4 1 1】

また、発明者らは、波長が 0. 5 ~ 1. 5 nm というX線を遮光するため、多層膜の積層厚さを異ならせた複数のX線吸収体を備えるX線マスクを試作した。この結果、積層厚さを調節することにより、波長ごとの遮光量、すなわちコントラストを変えることが可能であった。つまり、積層厚さを調節することによりX線の各波長ごとのコントラストを変えることができる。そして、この結果、高い

解像度を有する回路パターンを転写する場合により適したコントラストを有する X 線マスクの設計が可能となった。

【0 4 1 2】

なお、図 1 4 に示した X 線マスクでは、重元素としてモリブデンを、軽元素としてカーボンを用いたが、重元素としてモリブデンを、軽元素としてベリリウムを用いた X 線マスクを用いても同様の効果を得ることができる。

【0 4 1 3】

また、メンブレンとしてダイヤモンド薄膜を用いているので、従来の炭化珪素などをメンブレンとして用いた場合のように、波長が 0. 6 nm 近辺の X 線をメンブレンが吸収するというようなことを防止できる。

【0 4 1 4】

このような本発明による X 線マスクを、実施の形態 1 などに示した本発明による X 線露光装置における X 線マスクとして用いれば、従来よりも短波長領域の X 線を利用して、露光工程を行うことができる。

【0 4 1 5】

このように、X 線遮光体として作用する多層膜からなる X 線吸収体を用いるので、X 線吸収体の膜厚が厚くなることに起因して転写用回路パターンのアスペクト比が増大するという問題を解決することが可能となった。この結果、ピーク波長が 0. 5 nm 付近の短波長 X 線を用いて露光工程を行なうことが可能となった。つまり、X 線を用いた近接露光工程の解像限界の決定要因であるフレネル回折による解像限界を従来よりも微細なサイズ領域にまで拡大することが可能となった。この結果、従来よりもより高い解像度の回路パターンを転写することができる。

【0 4 1 6】

(実施の形態 1 5)

発明者らは、メンブレンとしてベリリウムを用い、重元素をロジウム、軽元素をベリリウムとした X 線マスクを作製した。この X 線マスクの構造は、基本的には図 1 4 に示した X 線マスクと同様である。また、ここでベリリウムからなるメンブレンは、イオンビームスパッタ法を用いて形成した。また、本発明の実施の

形態 1 4 と同様に X 線吸収体に転写パターンを形成した後、基板として用いたシリコンウェハを裏面よりエッチングにより除去することにより、窓 2 1（図 1 4 参照）を形成した。

【0 4 1 7】

このように、重元素としてロジウムを、軽元素としてベリリウムを用いた X 線マスクによっても、本発明の実施の形態 1 4 に示した X 線マスクと同様の効果を得ることができる。

【0 4 1 8】

なお、ここで、タンタル系材料やタングステン系材料などを X 線吸収体として用いた X 線マスクも、本発明による X 線露光装置において使用することができる。

【0 4 1 9】

（実施の形態 1 6）

図 1 5 は、X 線吸収体として用いられる材料についての X 線の波長と X 線の透過率との関係を示すグラフである。なお、図中の凡例において、たとえば、Re (2 1. 0 2) 0. 5 μ m とあるのは、試料として Re を用い、この試料の密度が 2 1. 0 2 g / c m³ であり、試料の膜厚が 0. 5 μ m であること示す。

【0 4 2 0】

ここで、本発明の実施の形態 8、9、1 1、1 3 などのように、X 線のピーク波長を短波長化した場合には、従来から X 線吸収体として用いられているタングステンやタンタル系の材料における X 線の透過率は低下する。

【0 4 2 1】

図 1 5 を参照して、X 線のピーク波長を 0. 4 ~ 0. 6 nm に設定すれば、従来のようにピーク波長が 0. 8 nm 付近である場合と比較して、X 線の透過率は 0. 1 ~ 0. 5 倍となる。すなわち、従来と同様のマスクコントラストを得るために必要な X 線吸収体の厚さを 0. 1 ~ 0. 5 倍にすることが可能となる。つまり、図 1 5 に示した材料を X 線吸収体としての X 線吸収体に用いれば、X 線吸収体の膜厚を薄くすることが可能であることがわかる。この結果、X 線マスクにおける転写用回路パターンのアスペクト比をより小さくすることができるので、X

線マスクにおける転写用回路パターンの微細化をより進めることが可能となる。

【0 4 2 2】

なお、本発明の実施の形態 2 ～ 1 6 に示した X 線ミラーおよび X 線マスクを本発明の実施の形態 1 に示した X 線露光装置に適用することができる。

【0 4 2 3】

(実施の形態 1 7)

図 1 6 は、本発明によるシンクロトロン放射装置を適用した X 線露光システムの概略図である。図 1 6 を参照して、シンクロトロン放射装置および X 線露光システムを説明する。

【0 4 2 4】

図 1 6 を参照して、シンクロトロン放射装置は、シンクロトロン放射源 1 と、平面ミラーである X 線ミラー 3 a ～ 3 c と、集光ミラー 2 2 と、拡大ミラー 2 3 と、を備える。そして、X 線露光システムは、上記のシンクロトロン放射装置と X 線マスク 6 とを備える。X 線ミラー 3 a ～ 3 c はベリリウムからなる。集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 は、それぞれロジウムからなる。ここで、シンクロトロン放射装置は X 線放射装置として用いられている。

【0 4 2 5】

シンクロトロン放射源 1 から出射した放射光 2 a は、図 1 6 に示すように、X 線ミラー 3 a ～ 3 c、集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 の順番に入射し、最終的には X 線マスク 6 を介してレジストが塗布されている半導体ウェハ 9 に照射される。

【0 4 2 6】

X 線ミラー 3 a ～ 3 c の配置は、図 9 に示した本発明による X 線ミラーの実施の形態 1 1 と同様である。そして、数 2 で示した数式を満足するようにその配置は決定されている。このため、本発明の実施の形態 1 1 と同様に、X 線ミラー 3 c から出射する反射光である放射光の光軸は、シンクロトロン放射源 1 から出射した放射光 2 a の光軸とほぼ重なることになる。また、本発明の実施の形態 1 1 と同様に、X 線ミラー 3 a ～ 3 c の位置や X 線ミラー 3 a ～ 3 c への放射光の斜入射角 α (図 9 参照) を変更する場合にも、数 2 で示した数式を満足するように

斜入射角 α などを決定すれば、X線ミラー3cから出射する放射光の光軸を、シンクロトロン放射源1から出射した放射光2aの光軸とほぼ重なる位置に保つことができる。この結果、X線ミラー3a～3cにおける放射光の斜入射角 α を変更した場合にも、集光ミラー22に入射する放射光の光軸の位置を一定に保つことができる。

【0427】

ここで、X線ミラー3a～3cを構成するベリリウムは、吸収端波長が11.1nmである。そして、ベリリウムはこの11.1nmより短波長側の波長領域において吸収端を有さない。このため、ベリリウムからなるX線ミラー3a～3cへの放射光の斜入射角を変更することにより、図13に示したように、0.45～0.7nmという波長領域において、任意のピーク波長を有するX線を得ることができると同時に、任意の波長より短波長領域のX線を吸収カットすることが可能である。

【0428】

次に、X線ミラー3cから出射した放射光は、集光ミラー22および拡大ミラー23に入射する。ここで、シンクロトロン放射源1から出射する放射光2aは、水平方向における出射角は比較的大きいが、垂直方向における出射角は比較的小さい。このため、X線ミラー3a～3cから出射する放射光をそのままX線マスク6に照射して露光工程を実施する場合には、垂直方向において十分な照射領域を確保することが難しい。このような問題を解決するため、拡大ミラー23では、放射光を反射する面が凸面状となっている。この結果、拡大ミラー23から出射する放射光2bの垂直方向における照射領域を拡大することができる。なお、ここでは拡大ミラー23として放射光を反射する面が凸面状になっているものを用いているが、このような拡大ミラーに代えて、ミラーを回転振動、あるいは平行振動させることによりミラーから出射する放射光2bの垂直方向における照射領域を拡大する、いわゆるミラースキャン方式の拡大ミラーを用いてもよい。

【0429】

また、放射光2aの水平方向における出射角が比較的大きいことから、X線ミラー3a～3cから出射する放射光をそのまま露光工程に用いたのでは、十分な

照射強度を得ることも難しかった。このような問題を解決するため、集光ミラー 2 2 では放射光を反射する面が凹面状となっている。この結果、集光ミラー 2 2 が存在しない場合には X 線マスク 6 に入射しないような大きな出射角における放射光について、X 線マスク 6 に入射するようにその放射光の進行方向を変更することができる。このため、X 線マスク 6 に入射する放射光の照射強度を高めることができる。

【0 4 3 0】

次に、拡大ミラー 2 3 から出射した放射光 2 b は X 線マスク 6 に照射される。X 線マスク 6 は、図 1 7 に示すように、ガードリング 1 9 とダイヤモンドメンブレン 1 6 と X 線吸収体 2 4 からなる転写用パターン 2 0 とを備える。転写用パターン 2 0 は、ダイヤモンドメンブレン 1 6 の裏面が露出している窓部 2 1 上に位置する領域に形成されている。ここで、図 1 7 は、図 1 6 における X 線マスクと半導体ウェハとを示す部分拡大断面図である。図 1 7 を参照して、ダイヤモンドメンブレン 1 6 の膜厚は $1\ \mu\text{m}$ とした。また、X 線吸収体 2 4 の材料としては、本発明の実施の形態 1 4 における X 線マスクの X 線吸収体と同様の材料を用いることができる。そして、X 線マスク 6 を透過した放射光 2 b は、表面にレジストが塗布された半導体ウェハ 9 に照射され、レジストを感光する。このようにして、レジストに X 線マスク 6 の転写用パターン 2 0 が転写される。

【0 4 3 1】

ここで、集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 を構成するロジウムは、図 3 に示したように、斜入射角が 1.0° 以下という条件で、波長がほぼ $0.45\ \text{nm}$ 以上の放射光を反射することができる。このため、集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 への放射光の斜入射角を 1.0° 以下とすることにより、 $0.45\ \text{nm}$ 以上の波長領域の放射光を確実に得ることができる。

【0 4 3 2】

また、本発明によるシンクロトロン放射装置および X 線露光システムでは、X 線ミラー 3 a ~ 3 c、集光ミラー 2 2 および拡大ミラー 2 3 は超高真空環境下に設置されている。一方、X 線マスク 6 および半導体ウェハ 9 は大気圧環境下、若しくは減圧されたヘリウム雰囲気中あるいは空気中に設置される。このため、拡

大ミラー 2 3 と X 線マスク 6 との間には真空隔壁となる X 線透過窓（図示せず）が設置される。この X 線透過窓の材料としてはベリリウムが用いてもよい。このベリリウムは 0. 4 5 ~ 0. 7 nm の波長領域において吸収端を有さない。このため、ベリリウム膜を用いた X 線透過窓は上記のような波長領域の X 線を効率よく透過させることができる。このように、X 線透過窓の材質としても、ベリリウムのような 0. 4 5 nm 未満の波長領域および 0. 7 nm 超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料、つまり 0. 4 5 nm 以上 0. 7 nm 以下の波長領域において吸収端を有さない材料を用いることが好ましい。ただし、X 線透過窓における X 線が透過する部分の膜厚を十分薄くできる場合には、上記以外の材料を用いてもよい。

【0 4 3 3】

また、本発明によるシンクロトロン放射装置および X 線露光システムでは、X 線マスク 6 のメンブレンとしてダイヤモンドメンブレン 1 6 を用いている。このダイヤモンドメンブレンを構成する炭素の吸収端波長は 4. 3 6 8 nm であり、この 4. 3 6 8 nm より短波長領域において炭素は吸収端を有さない。一方、従来メンブレンとして用いられていた炭化珪素は、0. 4 5 nm から 0. 7 nm の波長領域に吸収端を有しているため、図 5 に示すように、上記波長領域において X 線の透過率が低下する。このことから、従来の炭化珪素を用いたメンブレンと比べて、ダイヤモンドメンブレン 1 6 では、放射光に含まれる 0. 4 5 nm から 0. 7 nm の波長領域の X 線の透過率をより大きくできることがわかる。このように、図 1 7 に示したような X 線マスクを用いることにより、0. 4 5 nm ~ 0. 7 nm までの波長領域における放射光（X 線）2 b を有効に利用できる。

【0 4 3 4】

このように、本発明によるシンクロトロン放射装置および X 線露光システムでは、0. 4 5 nm ~ 0. 7 nm という波長領域の放射光（X 線）を得ることができ、かつ、X 線ミラー 3 a ~ 3 c での X 線の斜入射角を調節することにより、0. 4 5 nm ~ 0. 7 nm の波長領域における任意の波長より短波長側の放射光成分をカットできる。上記のような短波長側の放射光成分は、半導体ウェハに塗布されたレジスト中で光電子を発生させるため、レジストに転写される転写パター

ンの解像度を低下させる原因となる。しかし、本発明によれば、このような短波長側の放射光成分を確実に吸収カットできるので、レジストに転写される転写パターンについて高い解像度を確実に得ることができる。

【0435】

また、図16に示したシンクロトン放射装置およびX線露光システムにおいて、X線ミラー3a～3cに代えて2枚のベリリウムからなるX線ミラーを用いてもよい。この2枚のX線ミラーは、図8に示した本発明の実施の形態8におけるX線ミラーと同様の構成であってもよい。この場合、本発明の実施の形態8と同様の効果を得ることができる。そして、この2枚のベリリウムからなるX線ミラーにおける放射光の斜入射角 α （図8参照）を 0.5° （入射角を 89.5° ）に固定し、ロジウムからなる集光ミラー22および拡大ミラー23（図16参照）における放射光の斜入射角を 1.0° から 2.4° にまで変化させた場合の、拡大ミラー23から出射される放射光のスペクトルは図18に示される。ここで、図18は、ベリリウムからなるミラーとロジウムからなるミラーとを備えるX線露光システムにおいて得られるX線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

【0436】

ここで、ロジウムは、 0.3629 nm 、 0.39425 nm 、 0.41299 nm に吸収端を有し、ロジウムは 0.45 nm から 0.7 nm という波長領域に吸収端を有さない。このため、ロジウムからなるミラーを用いれば、 0.45 nm から 0.7 nm という波長領域においてX線が急激に吸収されることに起因してX線のスペクトルが乱れることはない。この結果、図18に示すように、ロジウムからなるミラーの斜入射角を変更しても、安定した滑らかな曲線状のスペクトルを示すX線を得ることができる。

【0437】

ここで、比較例として、上記のようなシンクロトン放射装置およびX線露光システムにおいて上記ロジウムからなるミラーに代えて白金からなるミラーを用いた場合に得られるX線のスペクトルを図19に示す。図19は、ベリリウムからなるミラーと白金からなるミラーとを備えるシンクロトン放射装置およびX

線露光システムにおいて得られるX線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。図19は、ベリリウムからなるミラーの斜入射角を 0.4° あるいは 0.5° （入射角を 89.6° あるいは 89.5° ）とし、白金からなるミラーの斜入射角を 0.4° から 2.0° （入射角を 89.6° から 88° ）まで変化させた場合のデータを示している。白金は、 0.4093 nm 、 0.4686 nm 、 0.559 nm 、 0.581 nm に吸収端を有するため、図19に示すように、吸収端に対応する波長においてX線の強度が低下している。そして、白金からなるミラーの斜入射角を変化させた場合にも、 0.45 nm から 0.7 nm という波長領域において、このように吸収端に対応する波長でX線の強度が低下している。

【0438】

このように、図18および図19を参照して、本発明によるロジウムからなるX線ミラーを用いた場合には、白金からなるX線ミラーを用いた場合より上記の波長領域におけるX線を有効に利用することができる。

【0439】

また、図19を参照して、白金からなるミラーの斜入射角を 0.4° （入射角を 89.6° ）とし、ベリリウムからなるミラーの斜入射角を 0.4° （入射角を 89.6° ）とした場合のX線スペクトル（以下スペクトル1とよぶ）が実線で表示されている。また、白金からなるミラーの斜入射角を 0.4° （入射角を 89.6° ）とし、ベリリウムからなるミラーの斜入射角を 0.5° （入射角を 89.5° ）とした場合のX線スペクトル（以下スペクトル2とよぶ）が点線で表示されている。このスペクトル1とスペクトル2とを比較すると、ベリリウムからなるミラーの斜入射角を 0.4° から 0.5° に変更することにより、 0.4 nm 以下の波長領域のX線を確実に吸収カットできることがわかる。

【0440】

また、図20は、2枚の金からなるX線ミラーから反射されたX線を、X線マスクのメンブレンを透過させた後のX線スペクトルを示している。ここで、図20は、X線マスクを透過した後のX線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。図20では、メンブレンとして本発明によるダイヤモンドメンブレンを用

いた場合と、従来の炭化珪素からなるメンブレンを用いた場合とを示している。

【0 4 4 1】

図 2 0 を参照して、メンブレンとして炭化珪素を用いた場合には、珪素が 0. 6 7 3 8 nm という波長域に吸収端を有するため、この吸収端波長において X 線の強度が大きく低下している。一方、X 線マスクのメンブレンとしてダイヤモンドメンブレンを用いた場合には、このような X 線の強度低下は発生していない。なお、ここでは金からなるミラーを用いているため、金の吸収端波長である 0. 3 6 1 6 nm、0. 3 9 3 6 nm、0. 4 5 1 8 nm、0. 5 3 7 4 nm、0. 5 5 8 4 nm において X 線の強度が低下している。

【0 4 4 2】

また、ここで図 1 6 に示したシンクロトロン放射装置および X 線露光システムにおいては、本発明の実施の形態 1 ～ 1 6 に示した X 線ミラーおよび X 線マスクを適用することができる。

【0 4 4 3】

(実施の形態 1 8)

X 線マスクについて、メンブレンと X 線吸収体として様々な材料を用いた場合のコントラストのデータをシミュレーションにより求めた。図 2 1 ～ 2 3 は、本発明による X 線マスクについての X 線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を示すグラフである。なお、ここでコントラストとは、X 線マスクにおいて、メンブレンのみを透過した X 線の強度の、X 線吸収体とメンブレンの両方を透過した X 線の強度に対する比率とする。

【0 4 4 4】

図 2 1 ～ 2 3 を参照して、様々なメンブレンと X 線吸収体との材料の組み合わせについて X 線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を調査した。ここで、図 2 1 における凡例の表示は、X 線ミラーの材質／ベリリウム窓の膜厚／X 線マスクのメンブレンの材質／X 線吸収体の材質（X 線吸収体の密度）を示している。具体的には、例えば Si C / Be 2 0 / Si C / W (1 6. 2) とあるのは、X 線ミラーの材質が Si C / ベリリウム窓のベリリウム薄膜の膜厚が 2 0 μ m / X 線マスクのメンブレンの材質が Si C / X 線吸収体の材質がタングステン (W) で

あり、このX線吸収体の密度は 16.2 g/cm^3 である、という意味である。

【0445】

図21を参照して、X線ミラーとしてSiCを用いたデータは、従来のX線露光条件に対応しており、 0.7 nm 超えの波長領域にピーク波長を有するX線をX線マスクに入射した場合である。また、X線ミラーとしてロジウム（Rh）を用いたデータは、本発明によるX線露光条件に対応しており、 0.45 nm 以上 0.7 nm 以上の波長領域のにピーク波長を有するX線をX線マスクに入射した場合である。

【0446】

まず、メンブレンとしてSiCを用い、そのメンブレン上に金属ウラン（U）からなるX線吸収体を形成したX線マスクに対して、SiCからなるX線ミラーにより反射したシンクロトロン放射光を照射した場合（従来の露光条件）のデータが黒丸の凡例により示されている。このSiCからなるX線ミラーにおける入射角は 89° とした。そして、メンブレンの膜厚は $2 \mu\text{m}$ とした。ここで、デザインルールが $0.05 \mu\text{m}$ 程度という高解像度のパターンを転写するために適したコントラストは3以上である。そして、図21を参照してこのコントラスト3を実現するために必要なウランからなるX線吸収体の膜厚は約 $0.18 \mu\text{m}$ であった。この場合、X線吸収体において形成される転写用回路パターンのアスペクト比は約3.6と、導波管効果の影響が顕著になるアスペクト比より十分小さい。つまり、上記のX線マスクは、従来の露光条件では適切なコントラストとアスペクト比とを両立できることがわかる。また、この従来の露光条件において、SiCに代えてダイヤモンド（Dia.）をメンブレンとして用いた場合も、ほぼ同様の結果となることがわかる。

【0447】

次に、上記のダイヤモンドメンブレンとウランからなるX線吸収体とを備えるX線マスクを、本発明による露光条件に適用した。その結果が、白四角の凡例で示されている。ここで、ロジウムからなるX線ミラーにおけるX線の入射角は 89° とした。この場合、図21に示すように、必要なコントラスト3を得るためには、ウランからなるX線吸収体の膜厚が約 $0.37 \mu\text{m}$ 必要であった。この場

合、デザインルールが $0.05\mu\text{m}$ であるときのアスペクト比は7.4と大きくなる。また、デザインルールが $0.035\mu\text{m}$ となった場合には、アスペクト比が10を超えてしまう。このようにアスペクト比が大きくなると、導波管効果により微細な回路パターンの転写が困難になる。

【0448】

次に、本発明による露光条件にダイヤモンドメンブレンとタングステンからなるX線吸収体とを備える本発明によるX線マスクを適用した場合が黒四角で示されている。ここで、ダイヤモンドを構成する炭素は 4.368nm という波長に吸収端を有する。このため、ダイヤモンドメンブレンが本発明による露光条件において露光光として用いられる 0.45nm 以上 0.7nm 以下という波長領域のX線を強く吸収することはない。また、タングstenは 0.68nm という波長に吸収端を有している。このため、本発明による露光条件において露光光として用いられるX線について、タングstenからなるX線吸収体のX線吸収率は十分大きくなる。この結果、図21に示すように、必要なコントラスト3を得るために必要なタングstenからなるX線吸収体の膜厚は約 $0.24\mu\text{m}$ であった。つまり、ウランをX線吸収体として用いた場合よりX線吸収体膜厚を小さくすることができる。この場合、デザインルールが $0.05\mu\text{m}$ であるときのアスペクト比は4.8となり、導波管効果の影響を小さくすることが可能である。この結果、十分なコントラストと小さなアスペクト比とを両立できるので、微細な回路パターンを転写することが可能であることがわかる。つまり、本発明による露光条件のように、従来よりも短波長領域のX線を露光光として用いる場合に、上記の本発明によるX線マスクは特に有効であることがわかる。

【0449】

なお、従来の露光条件に、SiCからなるメンブレンとタングstenからなるX線吸収体とを備えるX線マスクを適用した場合が黒四角+太線で示されている。この場合、図21からもわかるように、必要なコントラスト3を得るために必要なタングstenからなるX線吸収体の膜厚は約 $0.37\mu\text{m}$ となり、デザインルールが $0.05\mu\text{m}$ であるときのアスペクト比は7.4と大きくなる。この結果、従来の露光条件にタングstenからなるX線吸収体を適用した場合には微細

な回路パターンの転写が困難になることがわかる。

【0450】

また、本発明による露光条件に窒化硼素（BN）からなるメンブレンとタングステンからなるX線吸収体とを備えるX線マスクを適用した場合のデータも同様に示されている。この場合も、十分な大きさのコントラストと小さなアスペクト比とを両立できるので、微細な回路パターンを転写することが可能であることがわかる。なお、ダイヤモンドを構成する炭素の吸収端は4.368nmであり、窒素の吸収端は3.099nmである。

【0451】

次に、X線吸収体としてタンタル（Ta）およびタングステン（W）を用いた場合について、X線の波長スペクトルを変化させたときのコントラストとX線吸収体膜厚との関係を求めた。ここで、X線の波長スペクトルはベリリウム窓のベリリウム薄膜の膜厚を変更することにより変化させた。その結果を図22および23に示す。ここで、図22および23における凡例の表示は、基本的には図21における凡例の表示と同様である。ただし、X線ミラーを2枚用いた場合はその材質を併記しており、さらにX線ミラーへのX線の入射角も記した。例えば、Rh, Be 89.4 / Be 13 / Dia. 2 / Ta 16.5とあるのは、ロジウム（Rh）からなるX線ミラーとベリリウム（Be）からなるX線ミラーとを用い、BeからなるX線ミラーでのX線の入射角が89.4°である／ベリリウム窓のベリリウム薄膜の膜厚が13 μm / X線マスクのメンブレンの材質がダイヤモンドで膜厚が2 μm / X線吸収体の材質がタンタルであり、このX線吸収体の密度は16.5 g / cm³という意味である。

【0452】

図22を参照して、金（Au）をX線吸収体として用いた場合は、必要なコントラストを得るために必要なX線吸収体膜厚が本発明によるX線マスクの場合より厚くなることがわかる。また、金をX線吸収体として用いた場合には、本発明による露光条件においては、従来の露光条件よりも必要なコントラストを得るためのX線吸収体の膜厚が厚くなることもわかる。

【0453】

。そして、図 2 2 および 2 3 を参照して、ロジウムを X 線ミラーとして用いた本発明による露光条件において、ダイヤモンドメンブレンとタンタルおよびタングステンを用いた X 線吸収体とを備える本発明による X 線マスクを用いれば、大きなコントラストと小さなアスペクト比とを両立することができる。この結果、微細な回路パターンを転写することが可能であることがわかる。

【0 4 5 4】

なお、ここでは X 線吸収体としてタングステンおよびタンタルを用いたが、本発明による X 線マスクにおいて、TaGe、TaReGe、WN、WSi、WGe、WRe、WReGe などの合金や化合物を X 線吸収体として用いても同様の効果を得ることができる。また、メンブレンとしてダイヤモンドを用いたが、窒化硼素、ダイヤモンドライクカーボン、ベリリウムなどの 0.45 nm 以上 0.7 nm 以下の波長領域に吸収端を有さない材料をメンブレンとして用いれば、同様の効果を得ることができる。

【0 4 5 5】

また、実施の形態 1 8 に示した X 線マスクは、実施の形態 1 に示した X 線露光装置および実施の形態 1 7 に示したシンクロトロン放射装置および X 線露光システムに適用可能である。また、この実施の形態 1 8 における X 線マスクの X 線吸収体について、図 1 4 に示したようにこの X 線吸収体を多層構造としても、同様の効果を得ることができる。

【0 4 5 6】

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した実施の形態ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【0 4 5 7】

【発明の効果】

以上のように、請求項 1 ～ 5 7 に記載の発明によれば、短波長カット用の X 線ミラーを用いることにより、従来最適露光波長とされていた 0.7 nm よりも短波長領域にピーク波長を有し、かつ、そのピーク波長よりも短波長領域の X 線の

含有量が従来よりも少ない、X線露光に適した露光光を取出すことができる。この結果、従来よりも高い解像度の回路パターンを転写することが可能となると同時に、照射強度を大きくすることもできるので、高いスループットを実現することができる。また、上記のようなX線ミラーの材料を基板上に形成する方法を開発したので、大型のX線ミラーを使用することが可能となる。この結果、集光効率を高めることができるので、高いスループットを実現することが可能なX線露光装置およびX線露光方法を実現することが可能となった。

【0458】

また、請求項58および59に記載の発明によれば、X線吸収体の膜厚が厚くなることに起因して転写用回路パターンのアスペクト比が増大するという問題を解決することが可能となった。その結果、ピーク波長が0.5nm付近の短波長X線を用いて露光工程を行なうことが可能となった。つまり、X線を用いた近接露光工程の解像限界の決定要因であるフレネル回折による解像限界を従来よりも微細なサイズ領域にまで拡大することが可能となった。このため、従来よりもより高い解像度の回路パターンを転写することが可能となった。

【0459】

また、請求項60に記載の発明によれば、従来よりさらに高集積化された半導体装置を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明によるX線露光装置の実施の形態1を示す模式図である。

【図2】 本発明の実施の形態1～4におけるX線ミラーの材料についての、X線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

【図3】 本発明の実施の形態5におけるX線ミラーの材料についてのX線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

【図4】 本発明の実施の形態6におけるX線ミラーの材料についてのX線の波長とX線の反射率との関係を示すグラフである。

【図5】 本発明の実施の形態7におけるX線マスクのメンブレン材料についてのX線の波長とX線の透過率との関係を示すグラフである。

【図6】 本発明の実施の形態8において得られるX線の波長と相対強度と

の関係を示すグラフである。

【図 7】 本発明の実施の形態 9 において得られる X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

【図 8】 本発明の実施の形態 1 0 において、本発明による X 線ミラーを 2 枚用いた系での制御方法を示す模式図である。

【図 9】 本発明の実施の形態 1 1 において、本発明による X 線ミラーを 3 枚用いた系での制御方法を示す模式図である。

【図 1 0】 図 9 に示した系により得られる X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

【図 1 1】 本発明の実施の形態 1 2 において、本発明による X 線ミラーを 4 枚用いた系での制御方法を示す模式図である。

【図 1 2】 本発明の実施の形態 1 3 において、本発明による X 線ミラーを 4 枚用いた系における制御方法を示す模式図である。

【図 1 3】 図 1 2 に示した系において得られる X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

【図 1 4】 本発明の実施の形態 1 4 における X 線マスクを示す断面模式図である。

【図 1 5】 X 線マスクの X 線吸収体として用いられる材料についての X 線の波長と X 線の透過率との関係を示すグラフである。

【図 1 6】 本発明による X 線露光システムの概略図である。

【図 1 7】 図 1 6 における X 線マスクと半導体ウェハとを示す部分拡大断面図である。

【図 1 8】 ベリリウムからなるミラーとロジウムからなるミラーとを備えるシンクロトロン放射装置および X 線露光システムにおいて得られる X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

【図 1 9】 ベリリウムからなるミラーと白金からなるミラーとを備えるシンクロトロン放射装置および X 線露光システムにおいて得られる X 線の波長と相対強度との関係を示すグラフである。

【図 2 0】 X 線マスクを透過した後の X 線の波長と相対強度との関係を示

すグラフである。

【図 2 1】 本発明による X 線マスクについての X 線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を示すグラフである。

【図 2 2】 本発明による X 線マスクについての X 線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を示すグラフである。

【図 2 3】 本発明による X 線マスクについての X 線吸収体の膜厚とコントラストとの関係を示すグラフである。

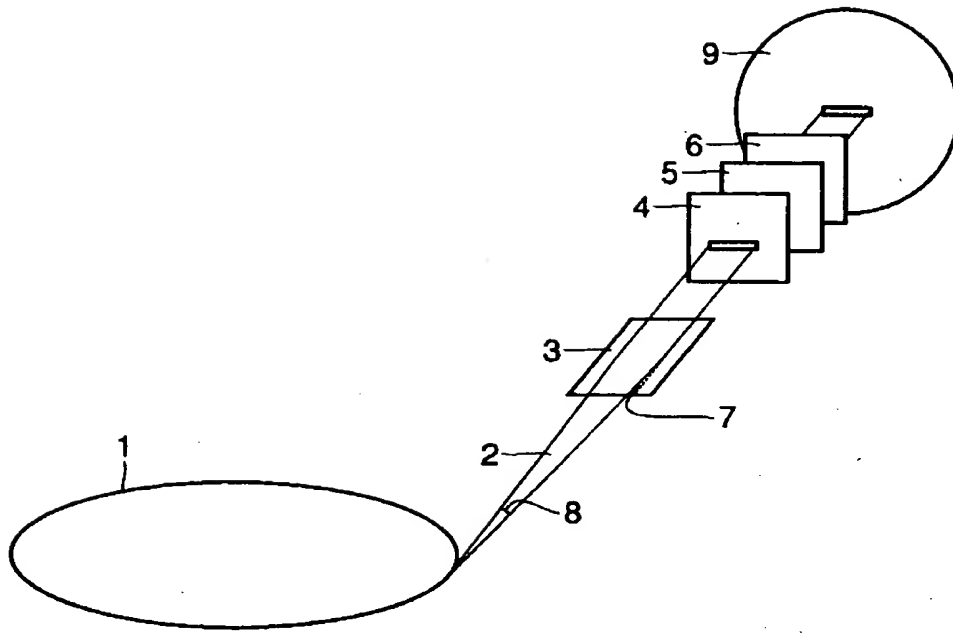
【図 2 4】 従来の X 線露光装置の構成図である。

【符号の説明】

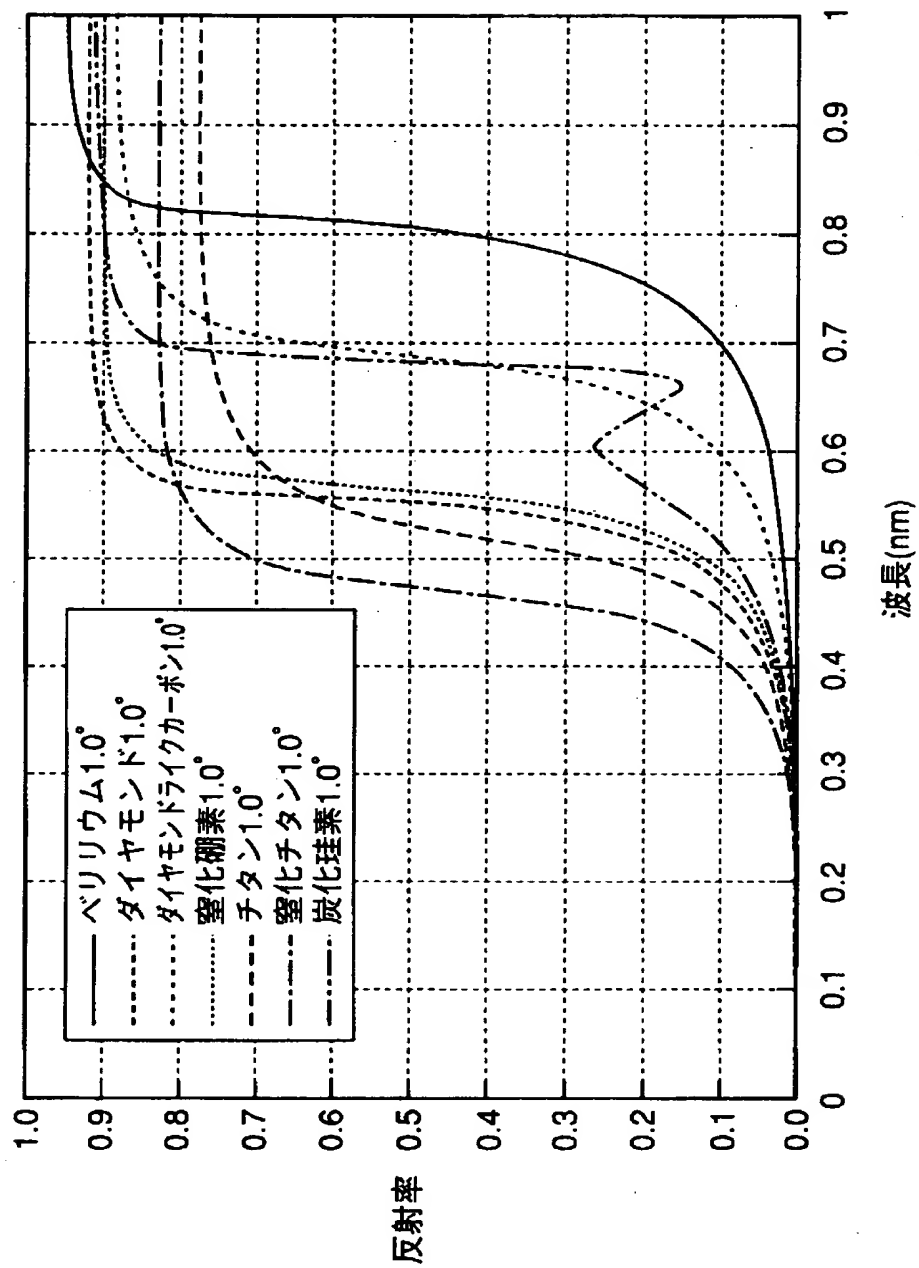
1 シンクロトロン放射源、2, 2 a, 2 b 放射光、3, 3 a～3 c X 線ミラー、4 ベリリウムからなる熱除去フィルタ、5 ベリリウム窓、6 X 線マスク、7 放射光の X 線ミラーに対する斜入射角、8 X 線ミラーの集光角、9 半導体ウェハ、10 X 線、11 1 段目 X 線ミラー、12 2 段目 X 線ミラー、13 3 段目 X 線ミラー、14 4 段目 X 線ミラー、15 基板、16 ダイヤモンドメンブレン、17 a～17 c モリブデン薄膜、18 a, 18 b カーボン薄膜、19 ガードリング、20 転写用パターン、21 窓部、22 集光ミラー、23 拡大ミラー、24 X 線吸収体。

【書類名】 図面

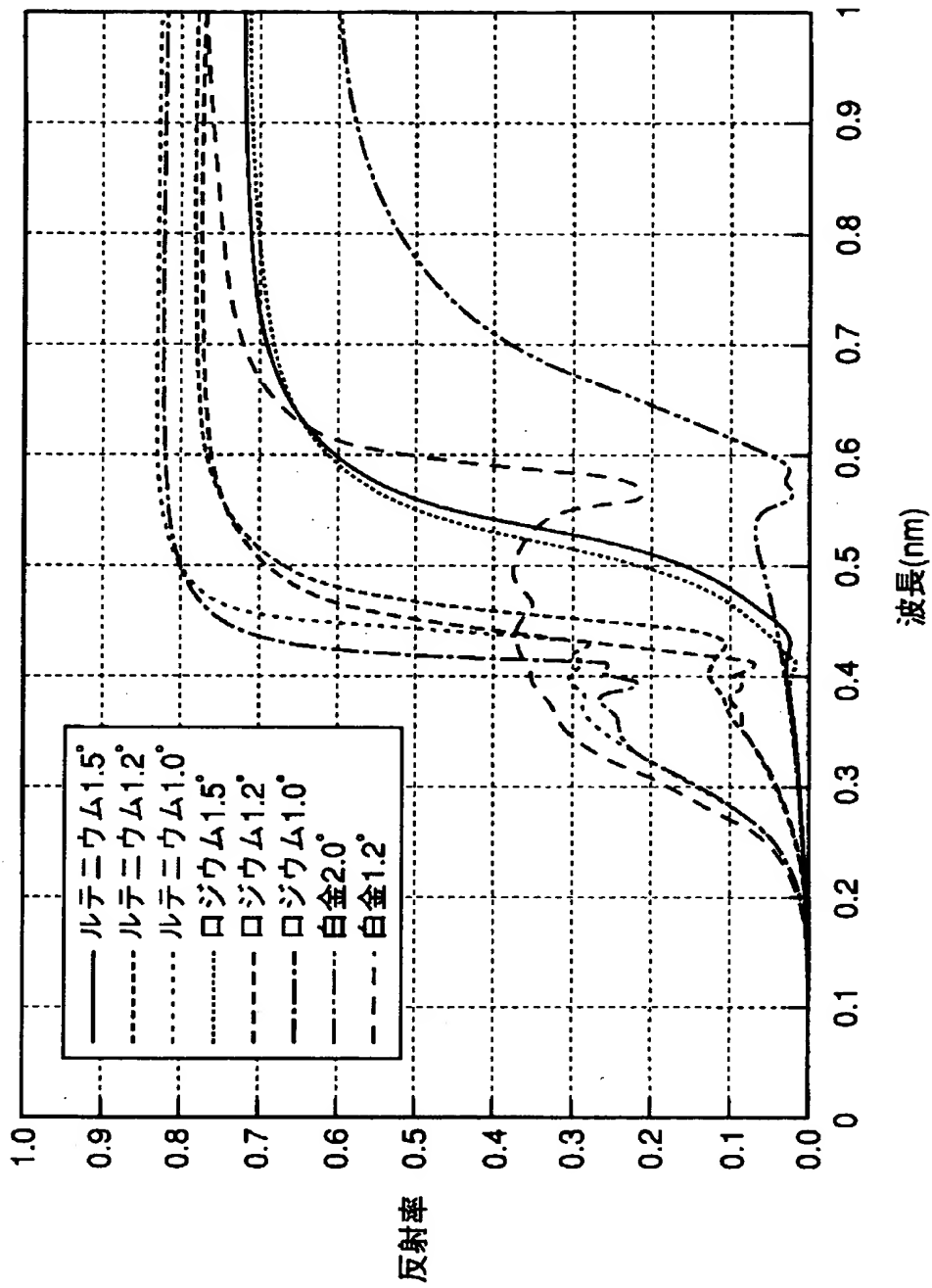
【図 1】



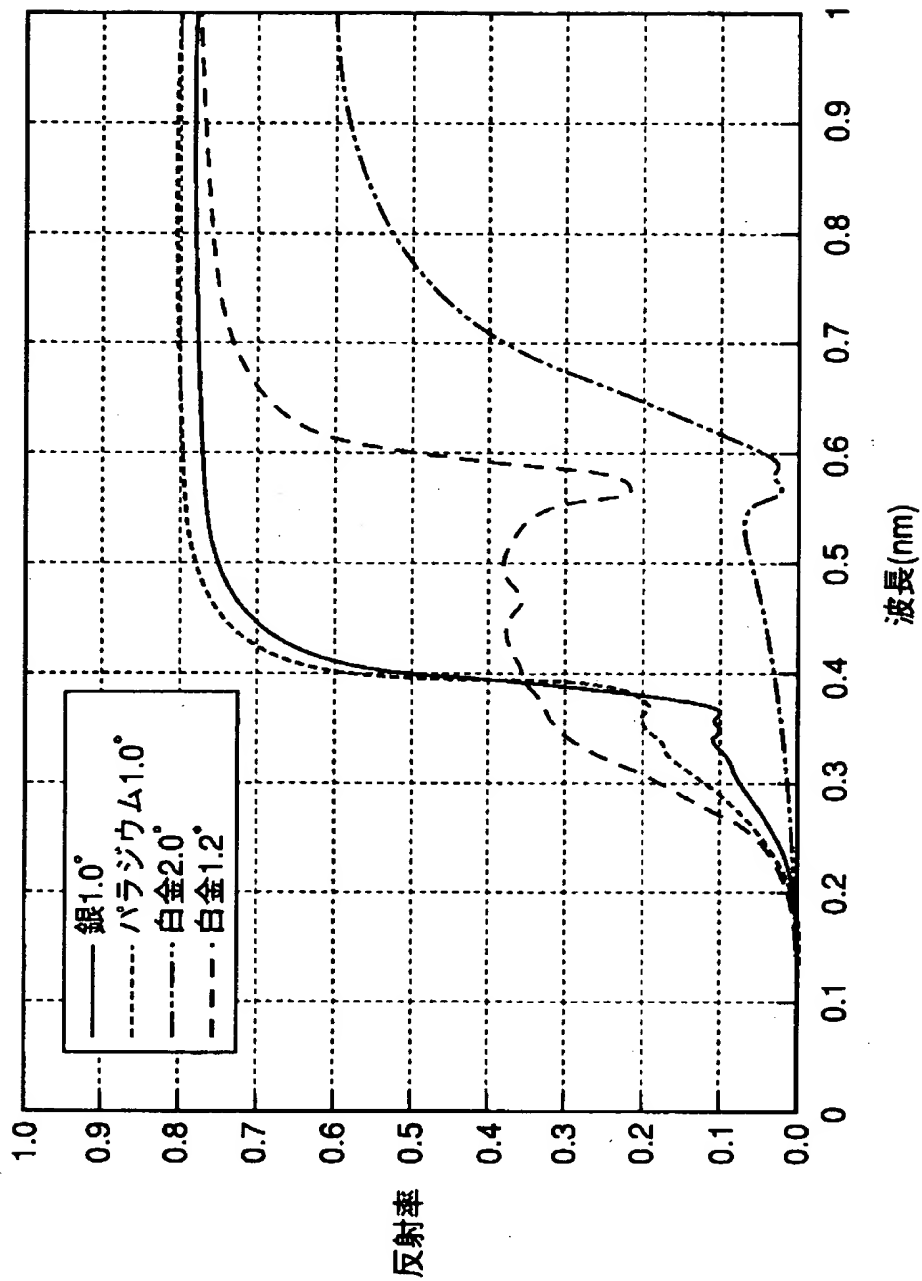
【図 2】



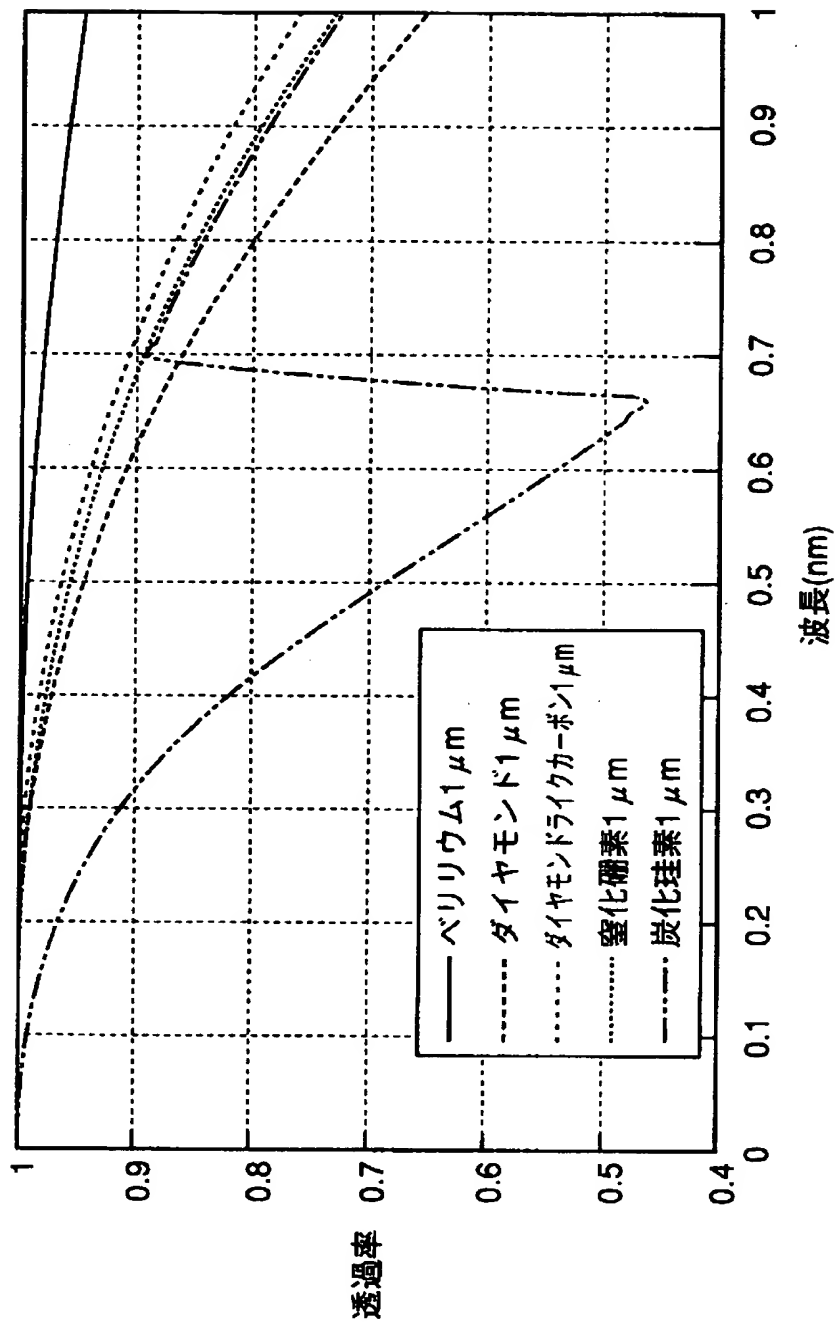
【図 3】



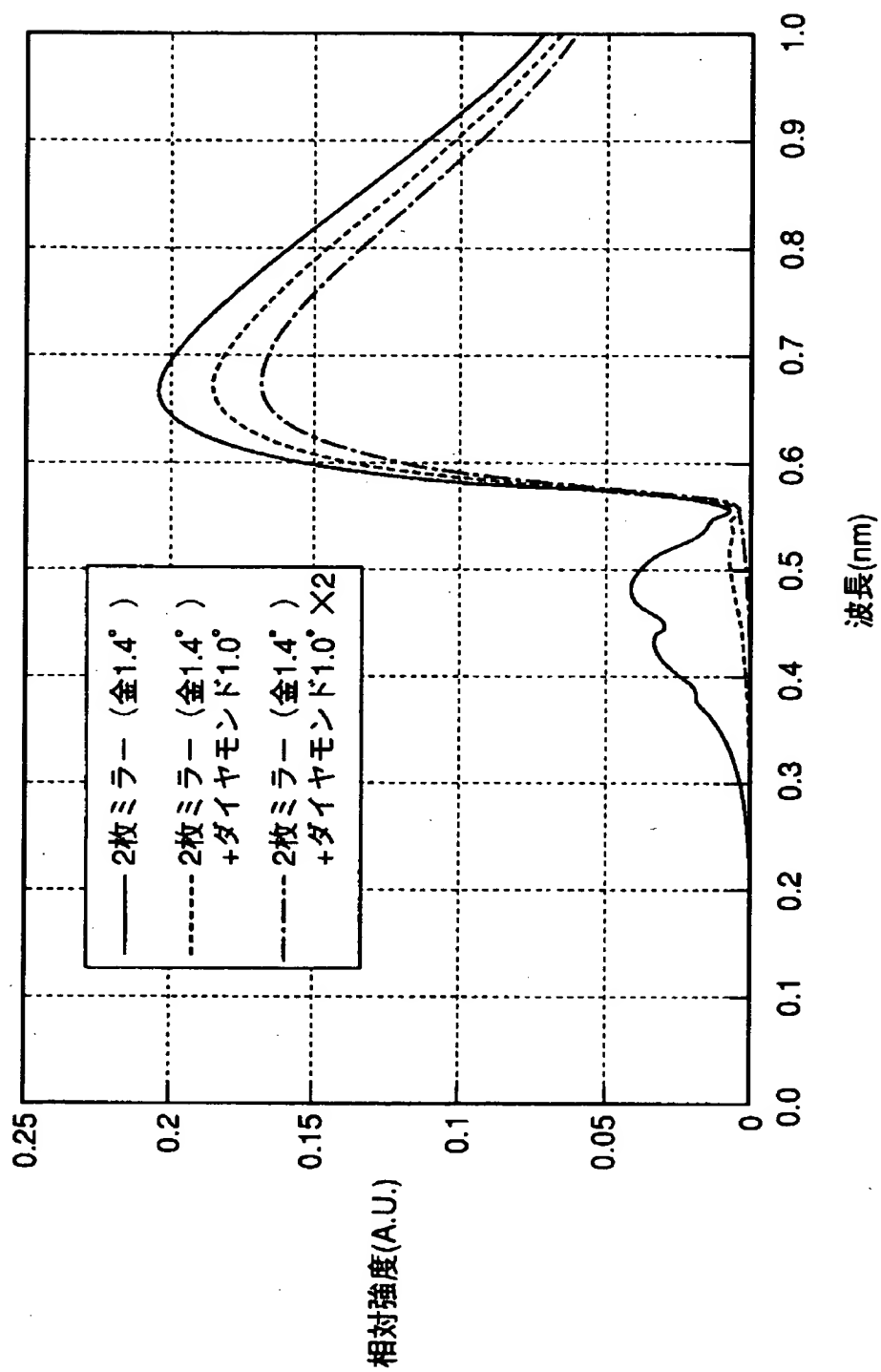
【図 4】



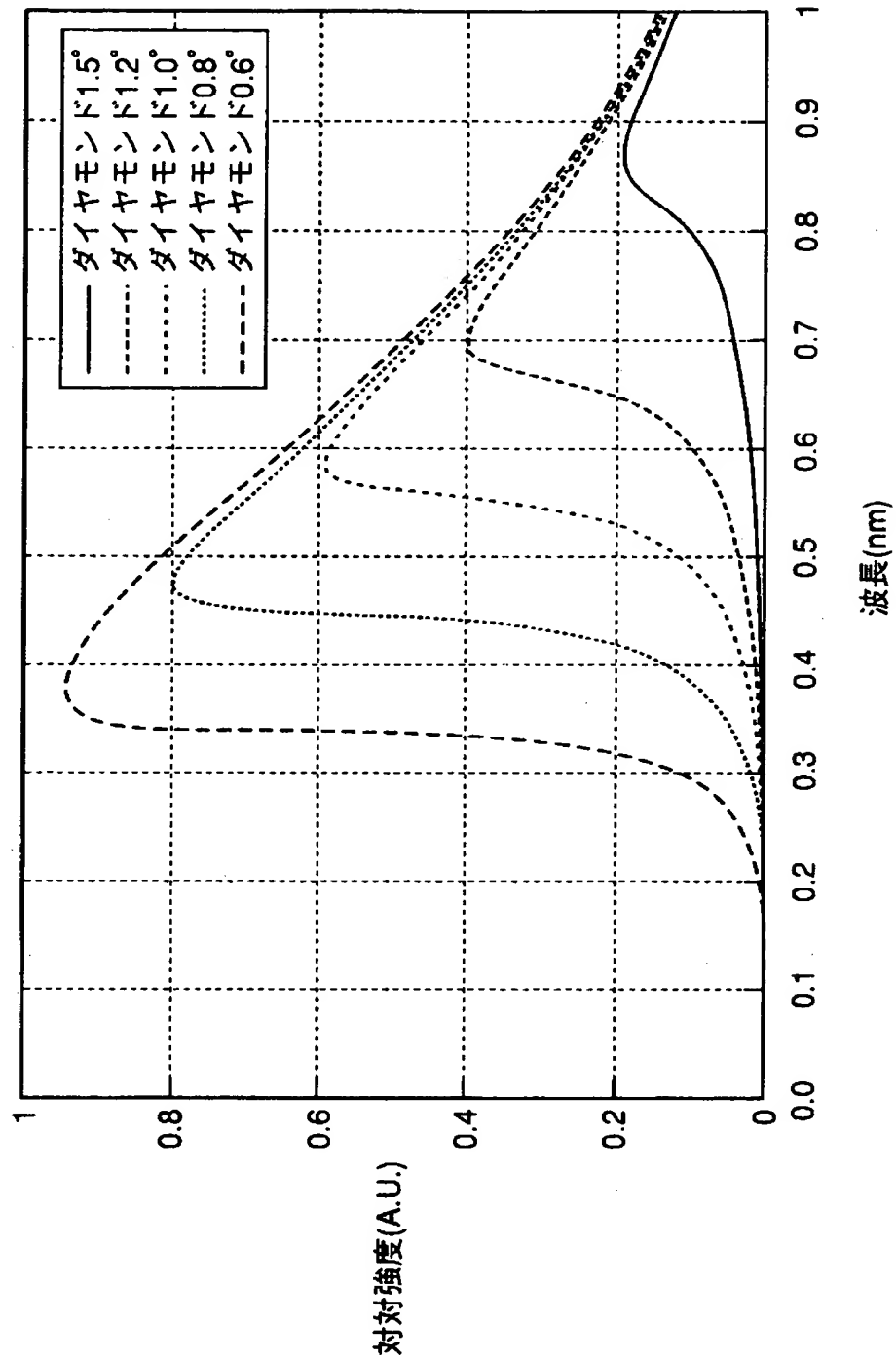
【図 5】



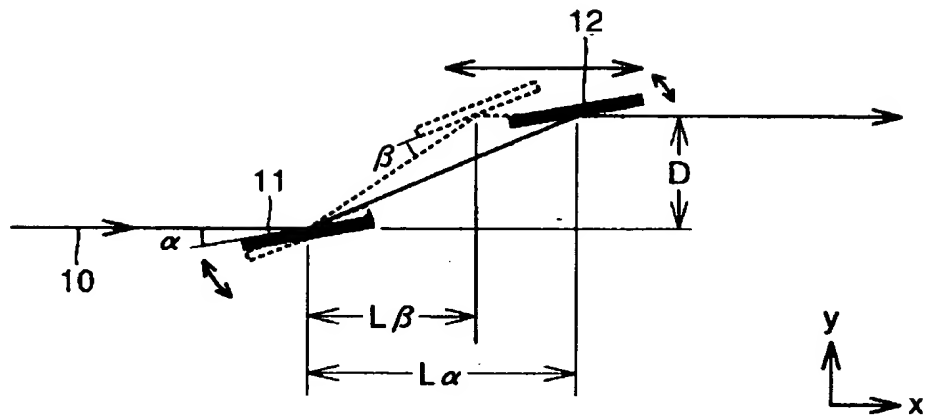
【図6】



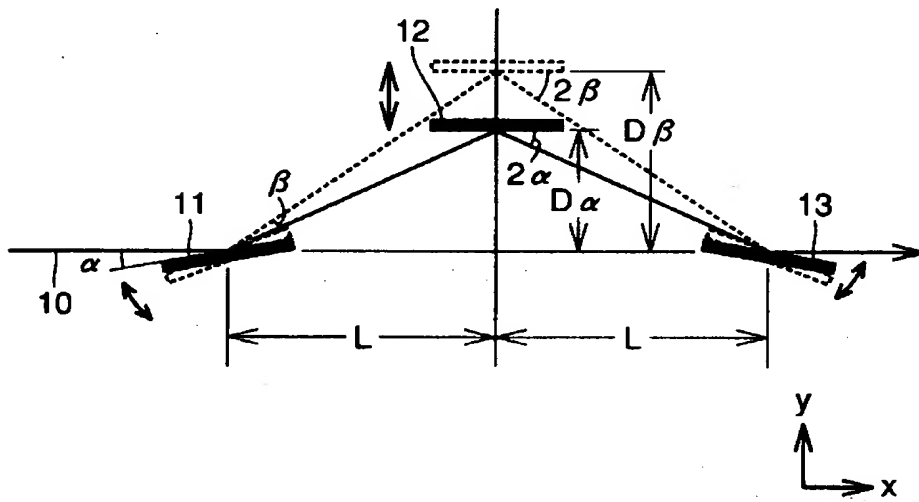
【図 7】



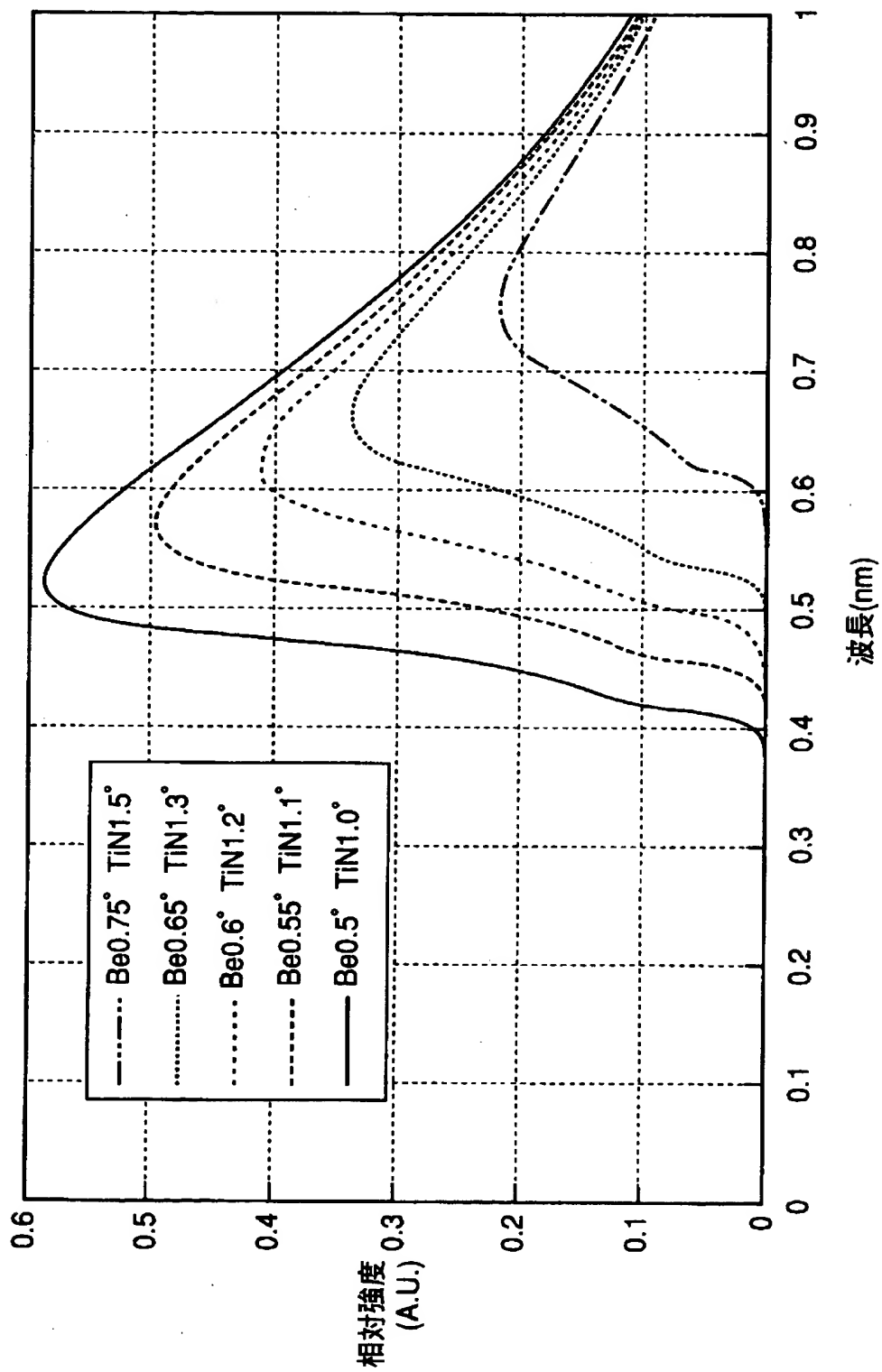
。【図 8】



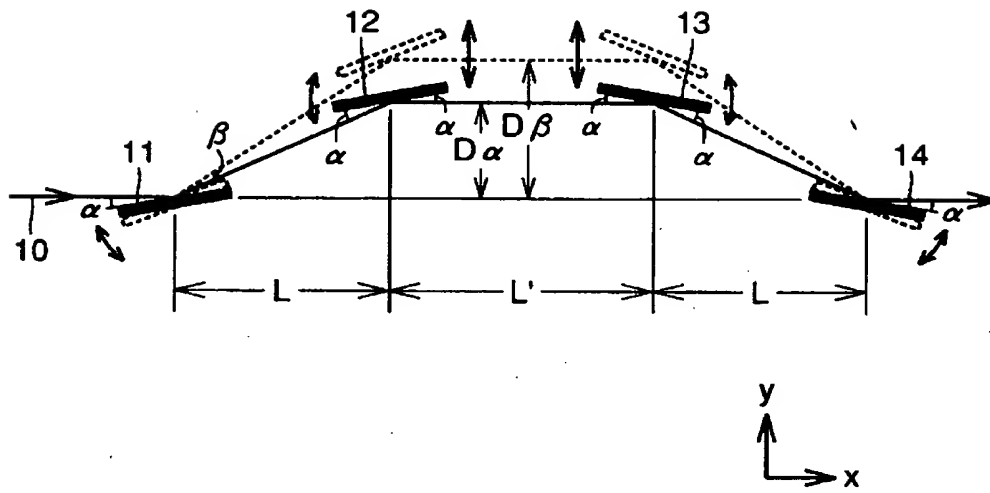
【図 9】



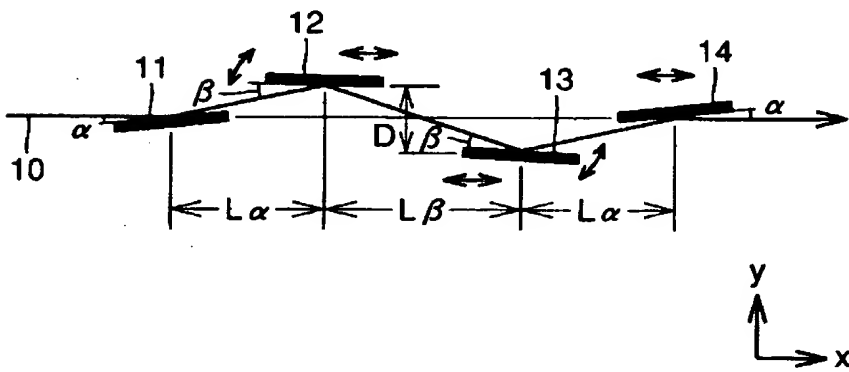
【図 10】



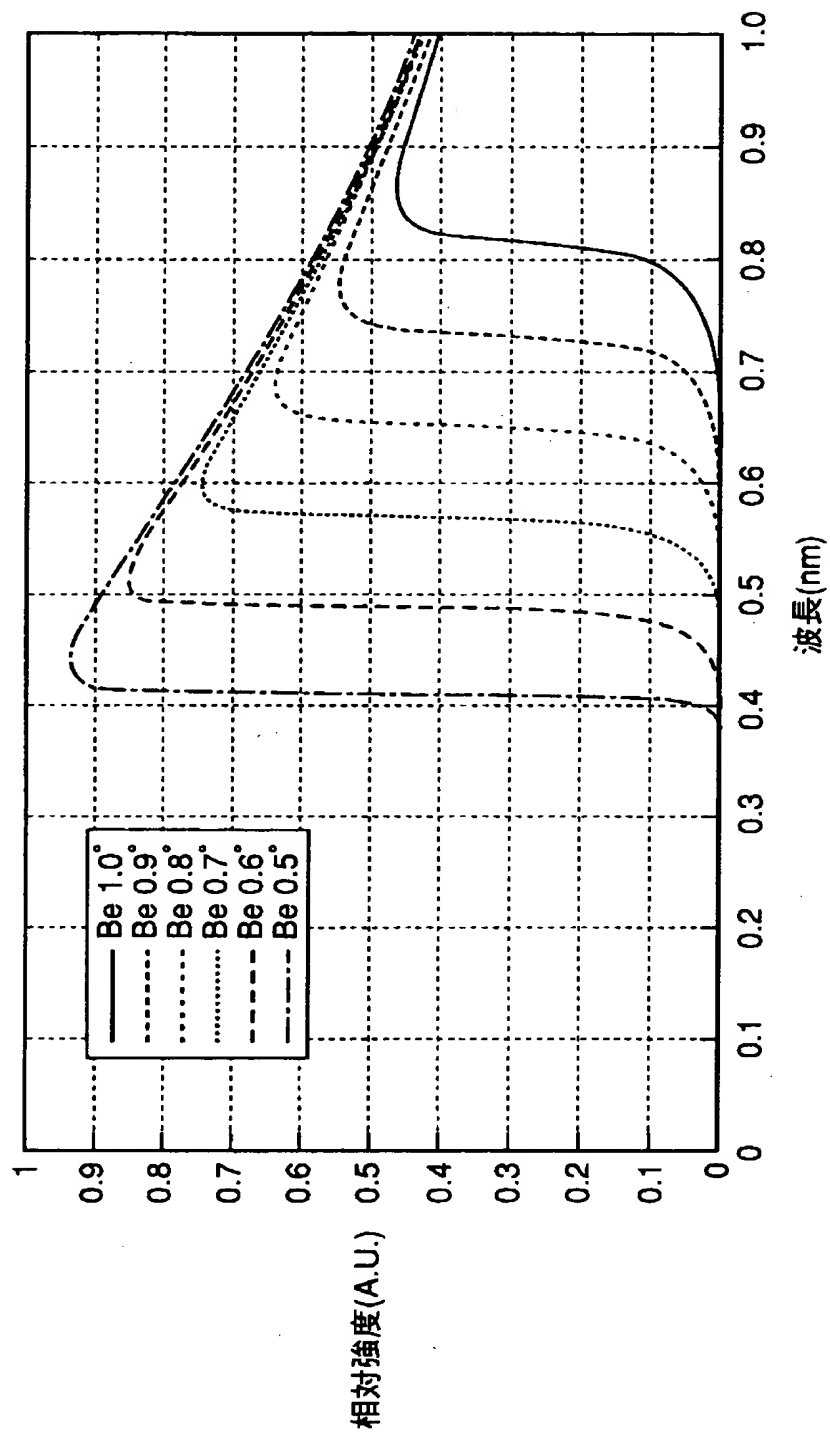
【图 1 1】



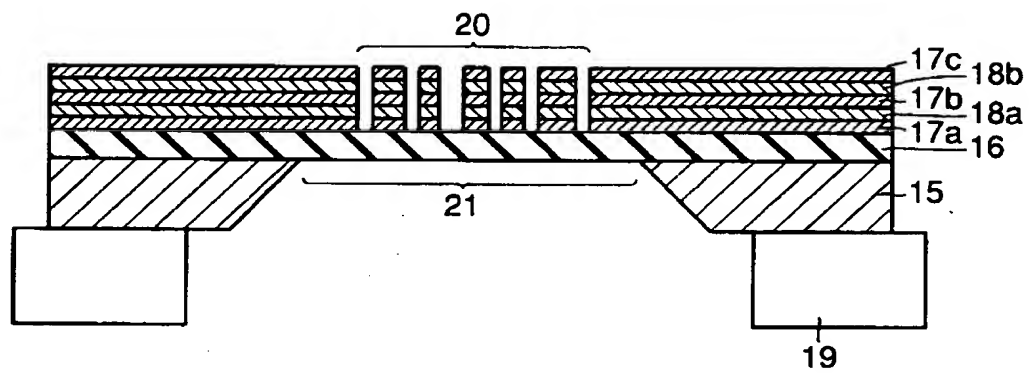
【图 1 2】



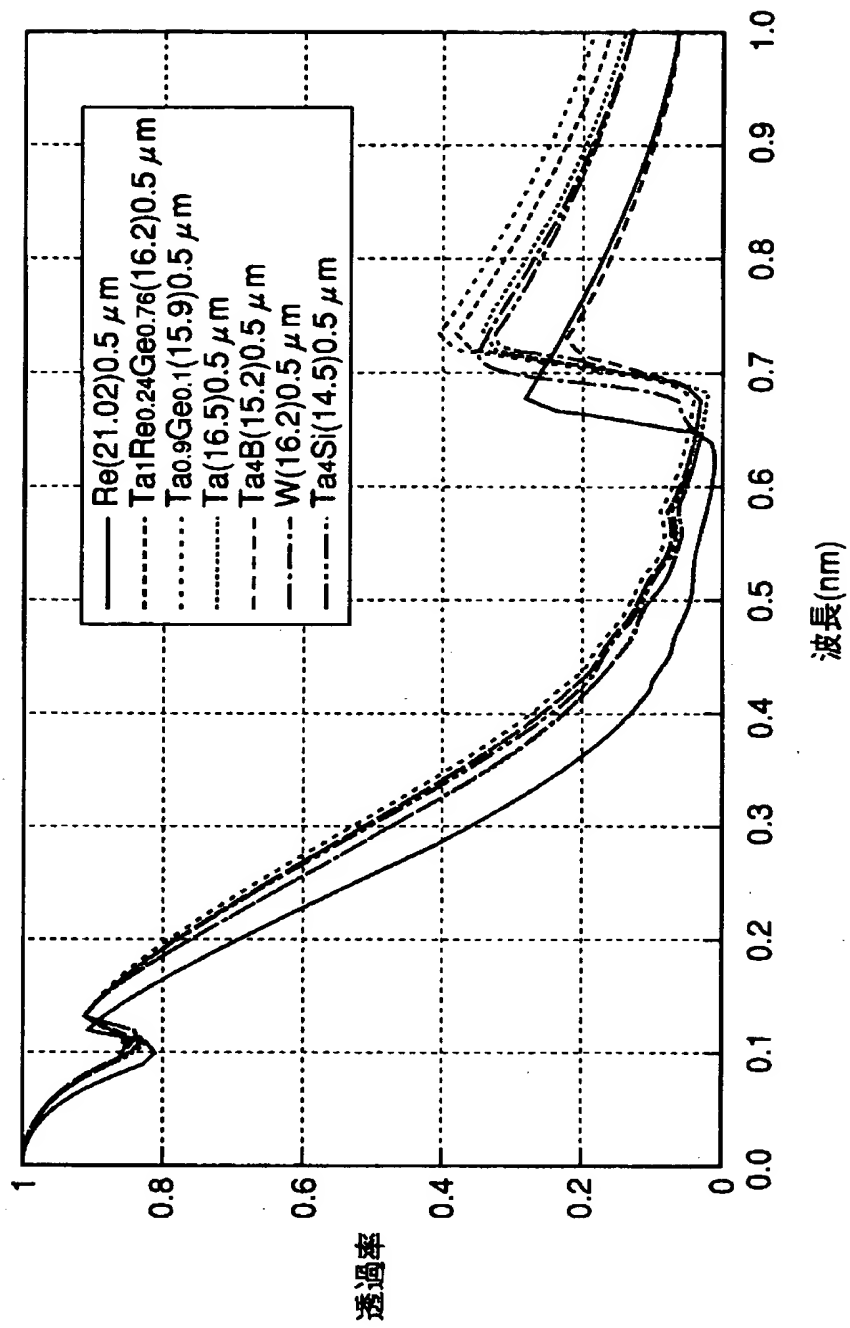
【図 1 3】



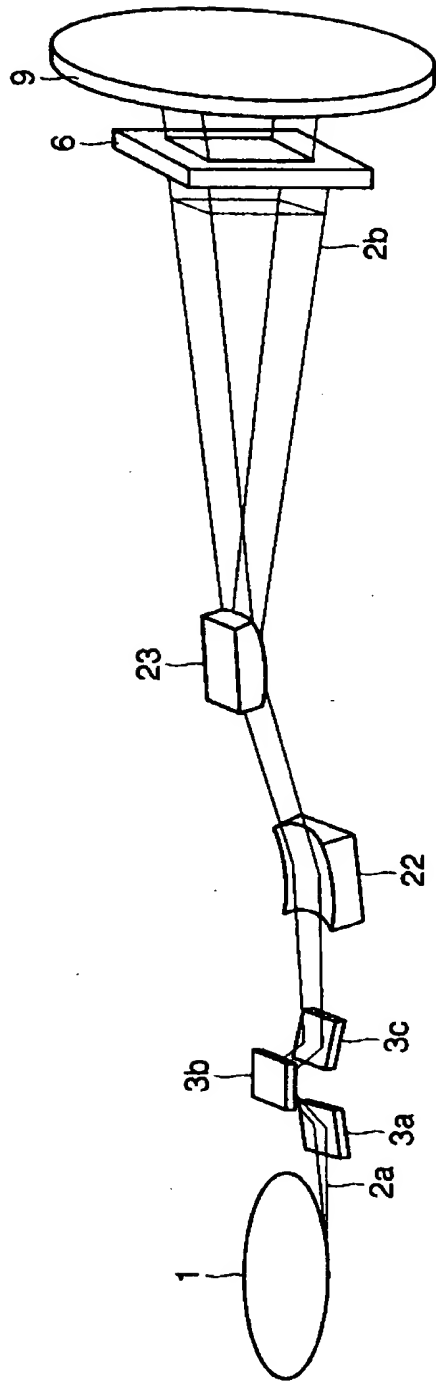
【図 1 4】



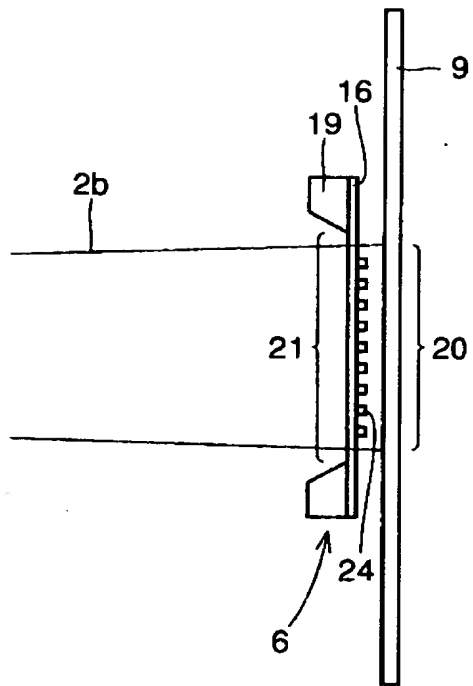
【図 15】



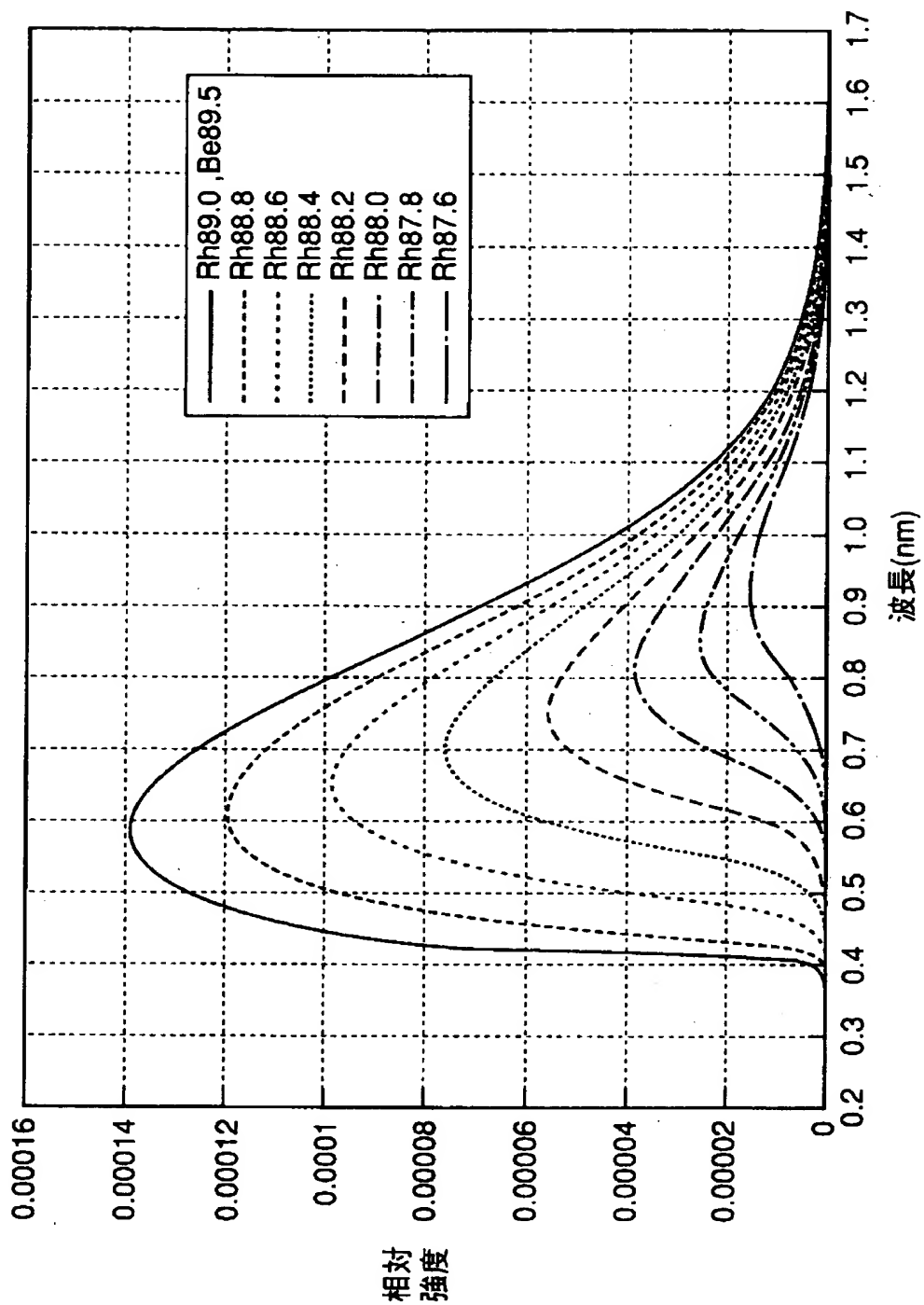
【図 1 6】



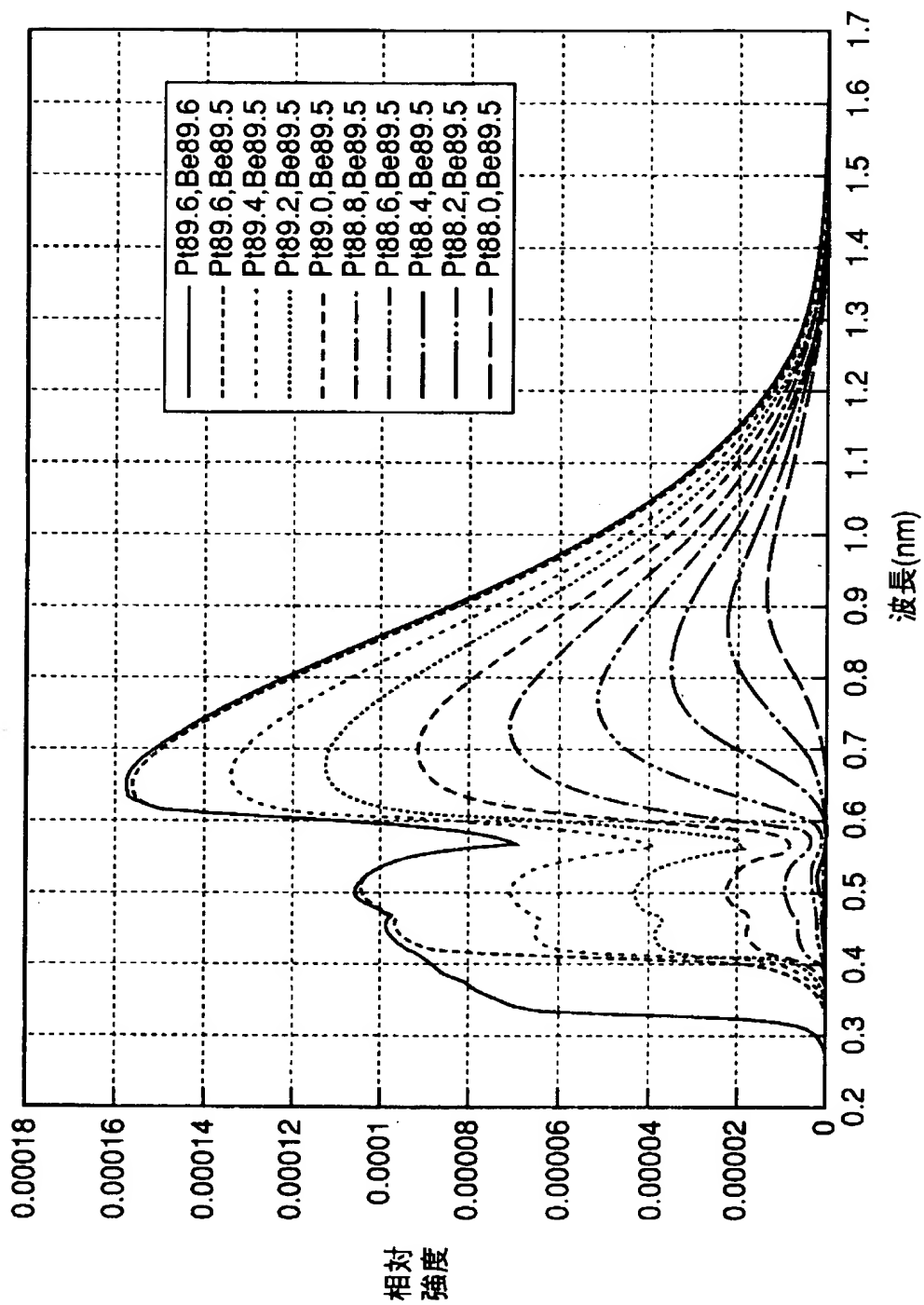
【図 1 7】



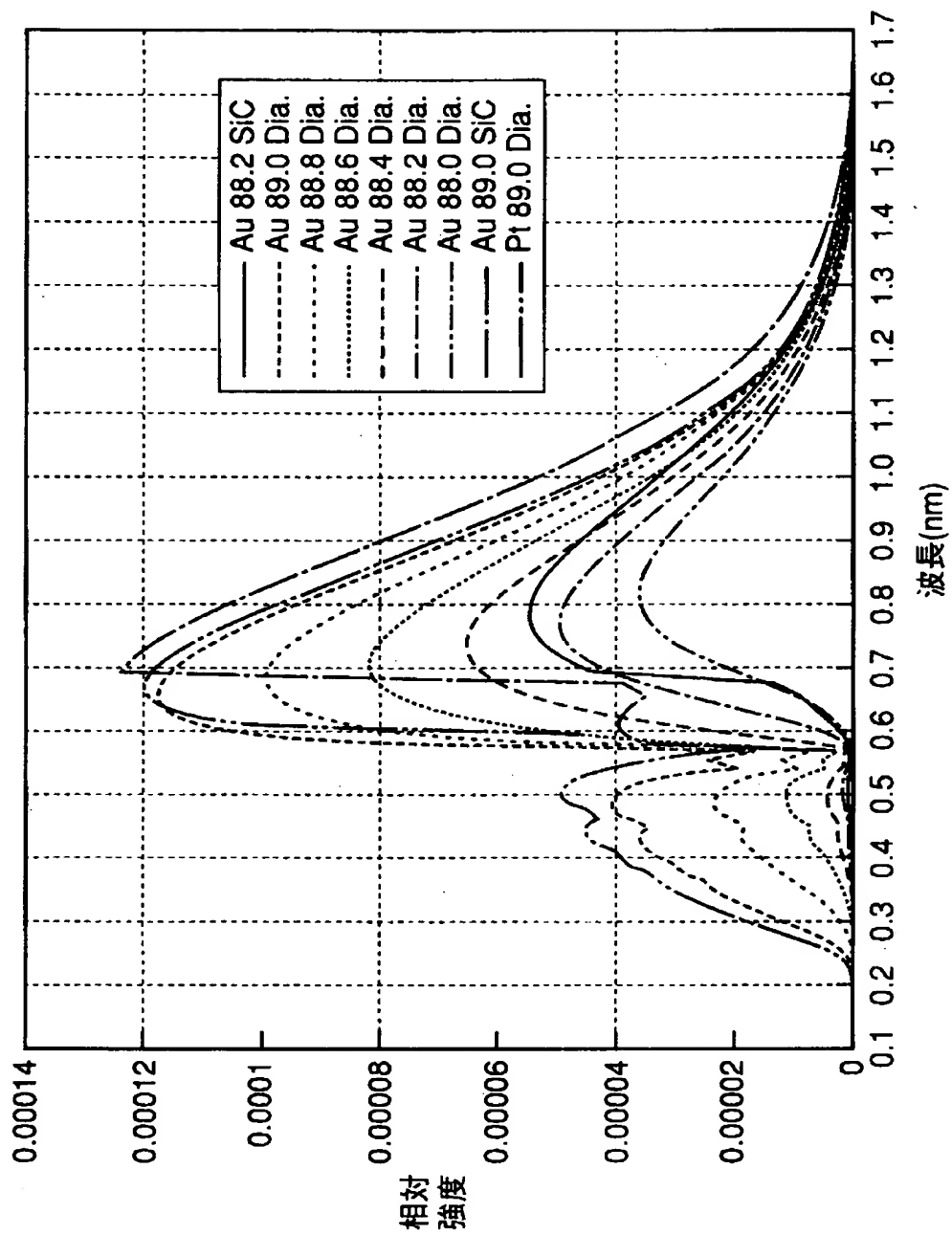
【図 1 8】



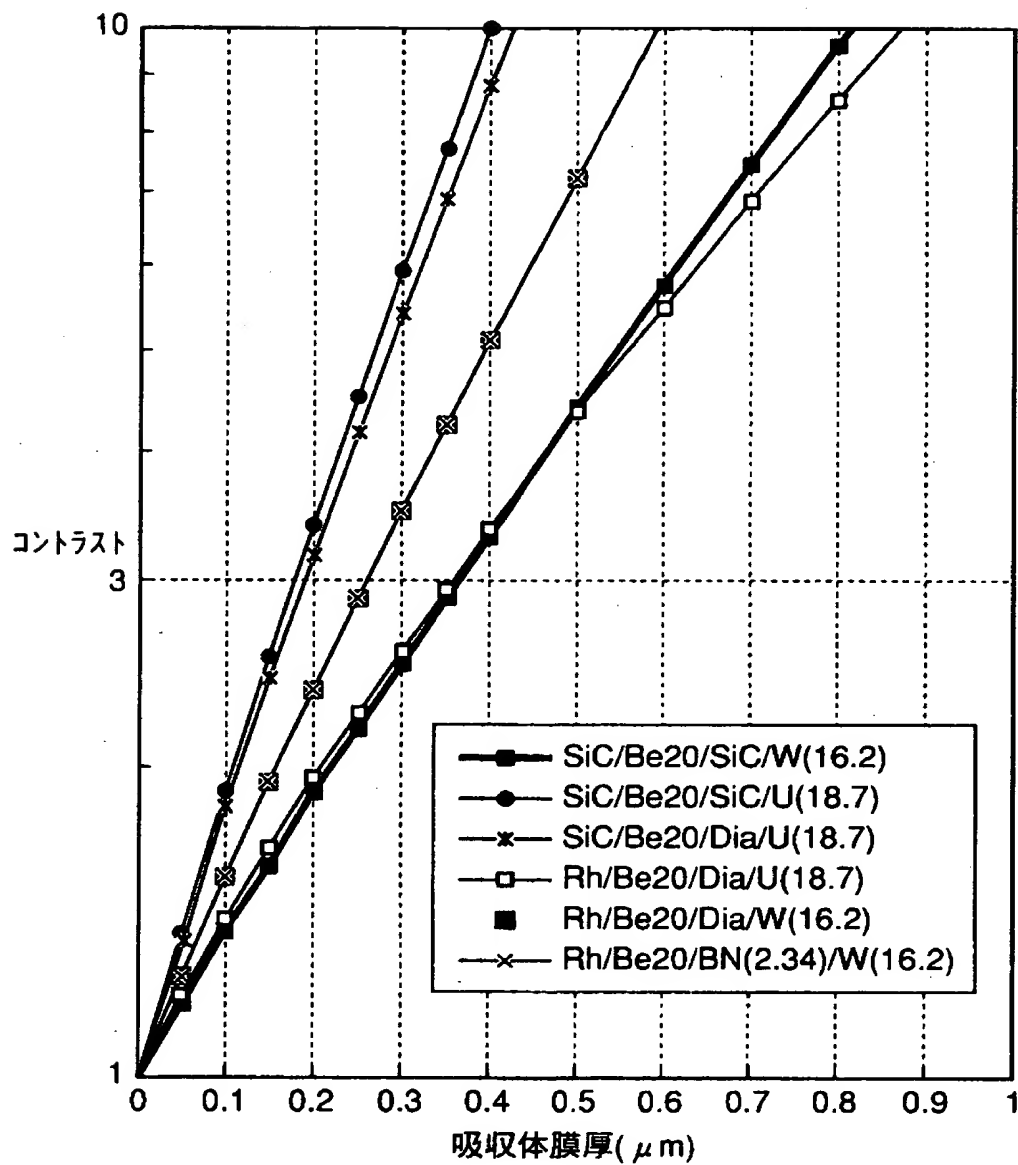
【図 1 9】



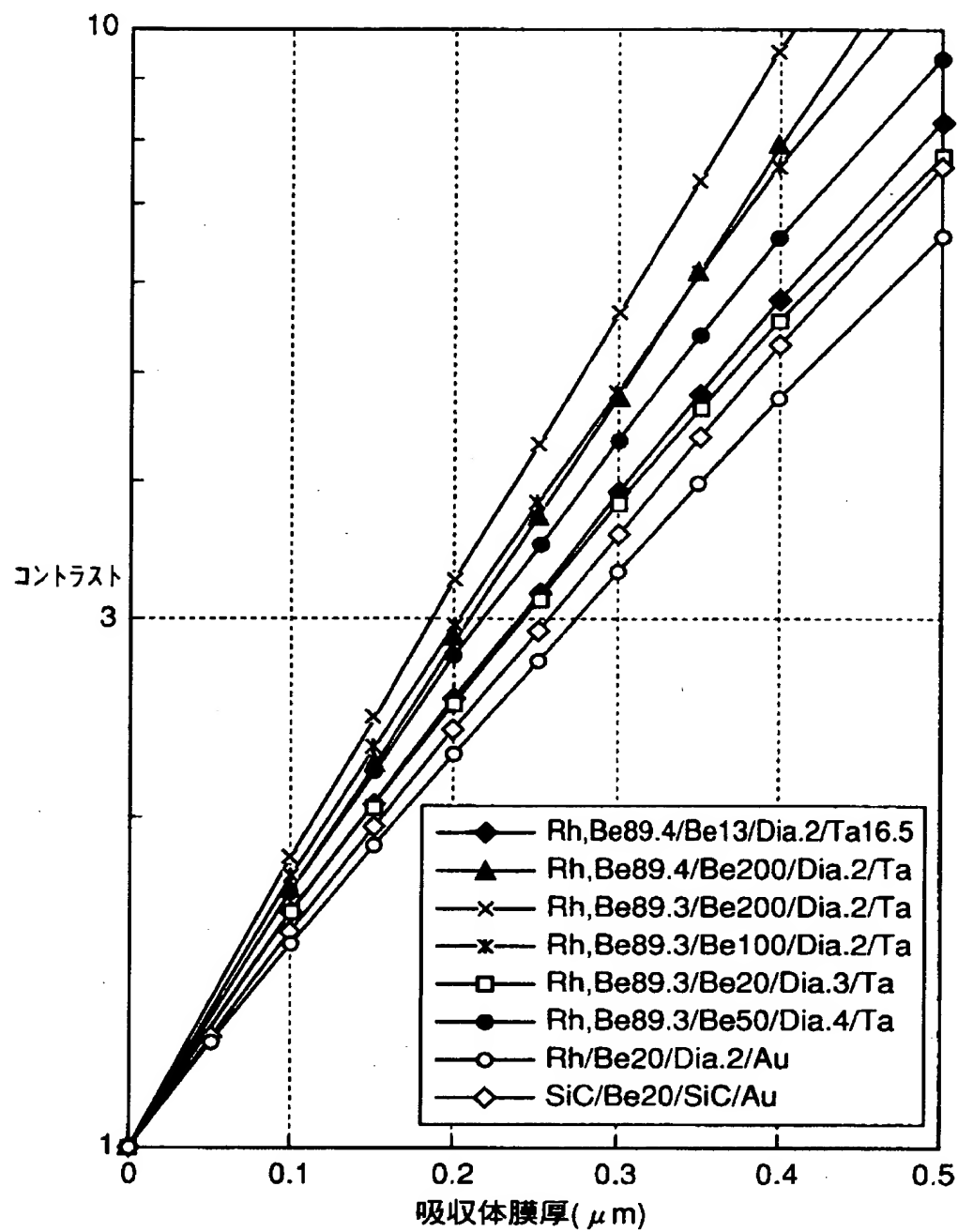
【図 2 0】



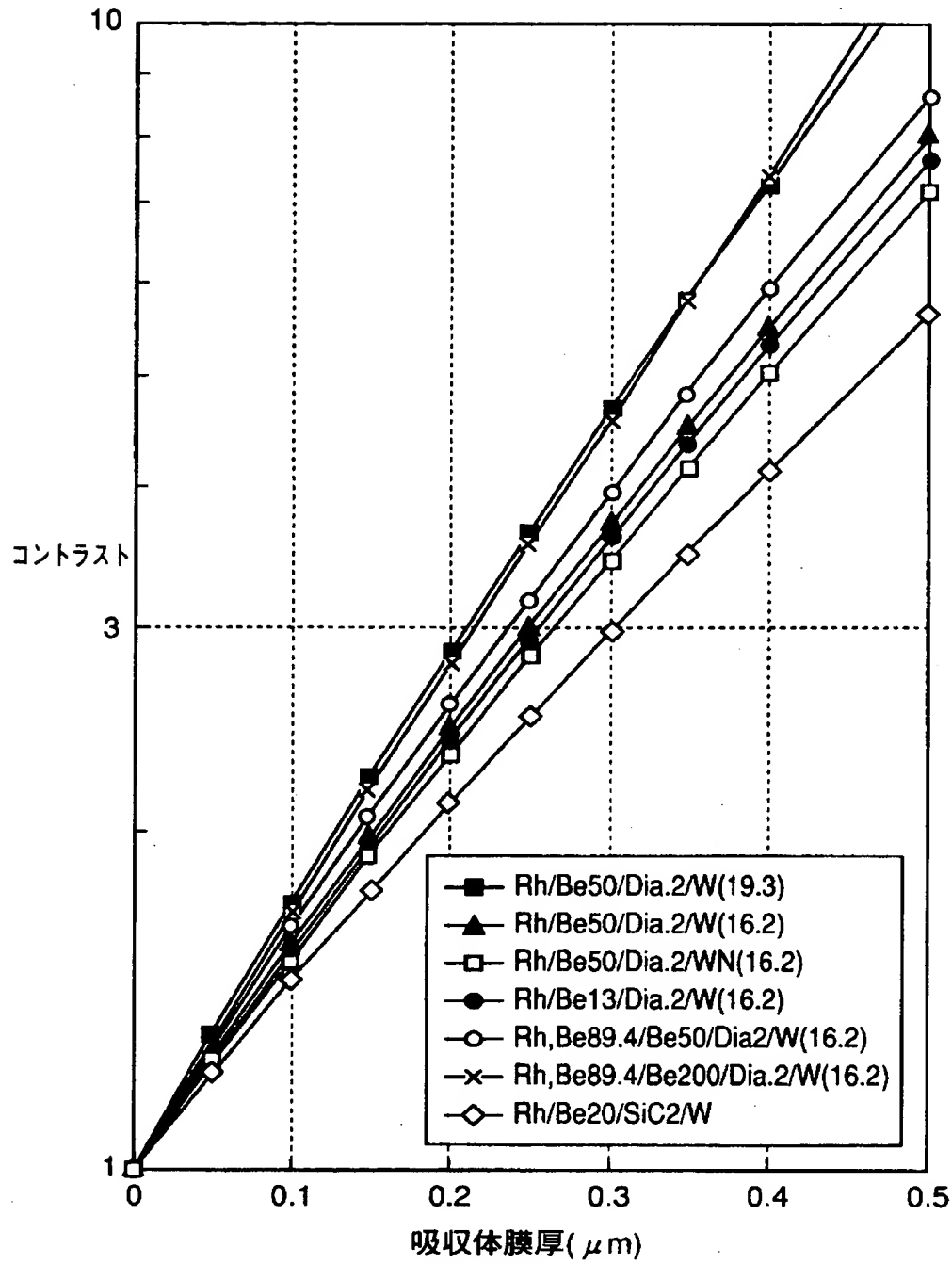
【図 21】



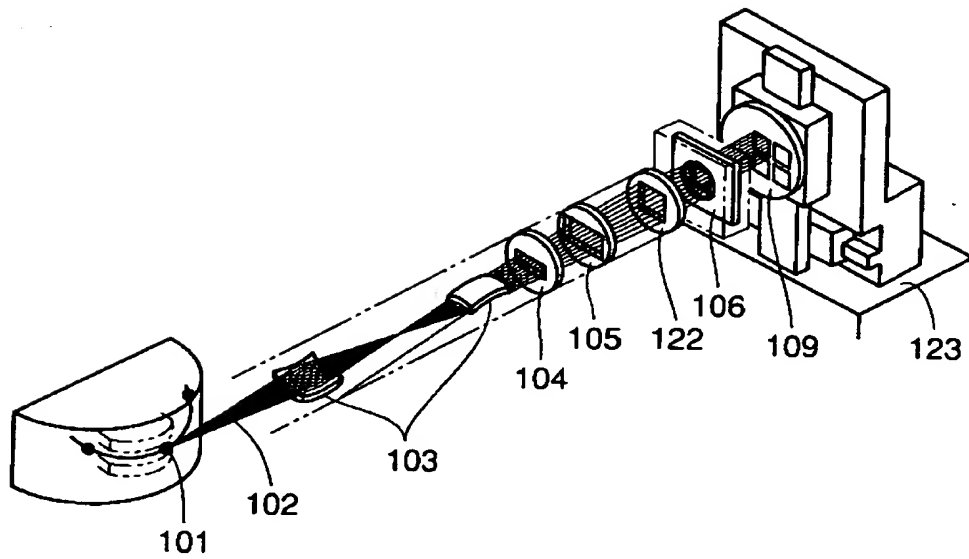
【図 22】



【図 23】



【図 2 4】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 従来よりも短波長領域のX線を用いることにより、高い解像度の回路パターンを転写することができ、かつ、高いスループットを実現することが可能なX線露光装置、X線露光方法、X線マスク、X線ミラー、シンクロトロン放射装置、シンクロトロン放射方法および半導体装置を提供する。

【解決手段】 X線露光装置は、X線について0.45nm未満の波長領域および0.7nm超えの波長領域の少なくともいずれか一方においてのみ吸収端を有する材料を含むX線ミラー3を備える。

【選択図】 図1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000006013]

1. 変更年月日 1990年 8月24日
[変更理由] 新規登録
住 所 東京都千代田区丸の内2丁目2番3号
氏 名 三菱電機株式会社

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000001007]

1. 変更年月日 1990年 8月30日
[変更理由] 新規登録
住 所 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
氏 名 キヤノン株式会社